

Dynamische Tourenplanung

Modifikation von klassischen Heuristiken für
das Dynamische Rundreiseproblem (DTSP) und
das Dynamische Tourenplanungsproblem (DVRP)

mit der Möglichkeit
der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr. rer. pol. der Wirtschaftswissenschaften

vorgelegt an der

Fakultät Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Kfm. Andreas Richter
aus Dresden

Erstgutachter: Prof. Dr. Rainer Lasch
Zweitgutachter: Prof. Dr. Udo Buscher
Tag der mündlichen Prüfung: 17.08.2005

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen der Tourenplanung	8
2.1 Bedeutung und Entwicklung des Straßengüterverkehrs	8
2.2 Einordnung der Tourenplanung in die betriebswirtschaftliche Logistik	14
2.3 Problemstellung der Tourenplanung und Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen	18
2.4 Zielstellungen der Tourenplanung	25
2.5 Komplexität von Tourenplanungsproblemen	28
2.6 Softwaregestützte Tourenplanung	30
2.7 Modelle und Verfahren zur Rundreise- und Tourenplanung	32
2.7.1 Grundlegende Begriffe und Klassifizierung der Verfahren	32
2.7.2 Methoden der Rundreiseplanung	33
2.7.3 Methoden der Tourenplanung	40
2.7.4 Beurteilungskriterien von heuristischen Verfahren	52
3 Grundlagen der dynamischen Tourenplanung	54
3.1 Definition statischer und dynamischer Tourenplanung	55
3.2 Literaturüberblick	71
3.3 Anwendungsgebiete	84
3.4 Lösungskonzepte für dynamische Problemstellungen	86
3.4.1 A priori Methoden	88
3.4.2 Real-time Methoden	97
3.5 Grad der Dynamik	112
3.6 Technische Komponenten zur Umsetzung der dynamischen Tourenplanung	118

4	Entwicklung von Verfahren zur dynamischen Rundreise- und Tourenplanung	131
4.1	Grundlagen und prinzipieller Ablauf der neu konzipierten dynamischen Rundreise- und Tourenplanungsverfahren	133
4.2	Modell und Verfahren zum Dynamic Traveling Salesman Problem (DTSP)	143
4.2.1	Ablauf und Modell des Dynamic Traveling Salesman Problems	143
4.2.2	Modifiziertes Verfahren Bester Nachfolger	147
4.2.3	Modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung	153
4.2.4	Modifiziertes Verfahren von Christofides	159
4.2.5	Modifiziertes Savingsverfahren	165
4.2.6	Heuristiken mit <i>Änderung aktueller Zug möglich</i> vs. Heuristiken mit <i>Änderung aktueller Zug nicht möglich</i>	171
4.3	Modell und Verfahren zum Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)	175
4.3.1	Ablauf und Modell zum Dynamic Vehicle Routing Problem	175
4.3.2	Modifiziertes Savingsverfahren	178
4.3.3	Modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung	188
4.4	Zielkonflikt zwischen Minimierung der Tourlänge und der Wartezeit	200
4.5	Durchführung numerischer Tests	203
4.5.1	Beschreibung der Testsoftware	203
4.5.2	Auswertung der Testergebnisse	209
4.5.3	Umsetzungshinweise	225
5	Zusammenfassung und Ausblick	227
	Literaturverzeichnis	235
	Anhang	248

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Binnenländisches Güterverkehrsaufkommen 1950 bis 2005	9
Abb. 2-2	Binnenländische Güterverkehrsleistung 1950 bis 2005	10
Abb. 2-3	Subsysteme der Unternehmenslogistik	15
Abb. 2-4	Vermeidung von Kurzzyklen beim TSP	35
Abb. 2-5	Lösungsverfahren zur Tourenplanung	42
Abb. 2-6	Idee der Savingswertbestimmung	46
Abb. 2-7	Tauschvarianten bei Inter-Tour-Verfahren	50
Abb. 3-1	Tourenplanungskategorien nach GHIANI et al.	66
Abb. 3-2	Vergleich verschiedener Definitionsansätze zur Unterscheidung von statischer und dynamischer Tourenplanung	68
Abb. 3-3	PTSP-Methode	89
Abb. 3-4	PVRP-Strategien	94
Abb. 3-5	FCFS-Strategie	99
Abb. 3-6	SQM-Strategie	99
Abb. 3-7	TSP-Strategie	100
Abb. 3-8	MOD TSP-Strategie	100
Abb. 3-9	NN-Strategie	101
Abb. 3-10	GEN-Strategie	101
Abb. 3-11	SFC-Strategie	101
Abb. 3-12	PART-Strategie	101
Abb. 3-13	Unterschiedlicher Status von Fahrzeugzügen	104
Abb. 3-14	Simulator zur dynamischen Tourenplanung nach LUND et al.	105
Abb. 3-15	Vergleich zwischen Veränderung und keiner Veränderung des aktuellen Zuges	111
Abb. 3-16	Unterschiedliche Verteilung von dynamischen Kunden im Dispositionszeitraum nach der Ankunftszeit	113
Abb. 3-17	Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Ankunftszeit und dem Kundenzeitfensterende der dynamischen Kunden	114
Abb. 3-18	Klassifizierung von Anwendungsgebieten der dynamischen Tourenplanung nach dem Grad der Dynamik und des primär verfolgten Zielkriteriums	115
Abb. 3-19	Dispositionssystem auf Basis von GPS und GSM	125
Abb. 3-20	Informationsflüsse im Planungs- und Dispositionsprozess	129
Abb. 4-1	Ablaufschema der dynamischen Rundreise- bzw. Tourenplanung	136
Abb. 4-2	Erzeugung eines statischen Teilproblems aus dem dynamischen Gesamtproblem bei der dynamischen Rundreiseplanung	138
Abb. 4-3	Erzeugung eines statischen Teilproblems aus dem dynamischen Gesamtproblem bei der dynamischen Tourenplanung	139
Abb. 4-4	Wirkung der Nebenbedingungen des Modells zur Beschreibung der statischen Teilprobleme bei der dynamischen Rundreiseplanung	146
Abb. 4-5	Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger	148

Abb. 4-6	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	149
Abb. 4-7	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	151
Abb. 4-8	Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung	154
Abb. 4-9	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	156
Abb. 4-10	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	158
Abb. 4-11	Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Verfahren von Christofides	161
Abb. 4-12	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens von Christofides mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	163
Abb. 4-13	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens von Christofides ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	164
Abb. 4-14	Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Savingsverfahren (DTSP)	166
Abb. 4-15	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	167
Abb. 4-16	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	169
Abb. 4-17	Wirkungsweisevergleich der Verfahrensvarianten (<i>Änderung aktueller Zug möglich/Änderung aktueller Zug nicht möglich</i>) beim modifizierten Verfahren Bester Nachfolger zur Lösung der Teilprobleme	172
Abb. 4-18	Wirkungsweisevergleich der Verfahrensvarianten (<i>Änderung aktueller Zug möglich/Änderung aktueller Zug nicht möglich</i>) beim modifizierten Verfahren von Christofides zur Lösung der Teilprobleme	173
Abb. 4-19	Wirkungsweisevergleich der Verfahrensvarianten (<i>Änderung aktueller Zug möglich/Änderung aktueller Zug nicht möglich</i>) beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung zur Lösung der Teilprobleme	173
Abb. 4-20	Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Savingsverfahren (DVRP)	181
Abb. 4-21	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	182
Abb. 4-22	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern	185
Abb. 4-23	Verteilung und Auftrittszeitpunkte der Kunden für das Beispiel zum modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP)	191

Abb. 4-24	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	192
Abb. 4-25	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung der modifizierten Sukzessiven Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	194
Abb. 4-26	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	196
Abb. 4-27	Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	198
Abb. 4-28	Zielkonflikt zwischen Minimierung der Tourlänge und Minimierung der Wartezeit	200
Abb. 4-29	Allgemeine Programmstruktur der Testsoftware	205
Abb. 4-30	Benutzeroberfläche DTSP-Software	206
Abb. 4-31	Grafische Veranschaulichungsmöglichkeiten der Verfahrenslösungen in der DTSP-Software	207
Abb. 4-32	Benutzeroberfläche DVRP-Software und grafische Lösungsdarstellung	208
Abb. 4-33	Durchschnittliche Ränge der Verfahren über alle Testläufe	218
Abb. 4-34	Entwicklung der Tourlänge bei steigendem Grad der Dynamik (DTSP-Verfahren)	221
Abb. A2-1	Lösung durch Bester Nachfolger	252
Abb. A2-2	Lösung durch Savings-Verfahren	252
Abb. A2-3	Lösung durch Sukzessive Einbeziehung	252
Abb. A2-4	Lösung durch Verfahren von Christofides	252
Abb. A5-1	Geographische Lage aller Kunden und die tatsächlich gefahrenen Strecken der Fahrzeuge bei Anwendung des <i>modifizierten</i> Savingsverfahrens mit Variante <i>Änderung aktueller Zug möglich</i>	260
Abb. A5-2	Geographische Lage aller Kunden und die tatsächlich gefahrenen Strecken der Fahrzeuge bei Anwendung des <i>modifizierten</i> Savingsverfahrens mit Variante <i>Änderung aktueller Zug nicht möglich</i>	262

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Anteilsverschiebung im Binnengüterverkehr von 2005 gegenüber 1960	10
Tab. 2-2	Erwartetes Güterverkehrsaufkommen nach Gütergruppen 2007	10
Tab. 2-3	Merkmale von Tourenplanungsproblemen	22
Tab. 2-4	Rechenzeit in Abhängigkeit vom Rechenaufwand und von der Problemgröße	30
Tab. 3-1	Zu beachtende Restriktionen und Handlungsempfehlungen bei verschiedenen dynamischen Transportaufgaben	61
Tab. 3-2	Überblick bzgl. der Arbeiten zur dynamischen Tourplanung	83
Tab. 3-3	Testergebnisse für zufällige Graphen mit einem Depot und 50 unsicheren Kunden	93
Tab. 3-4	Restriktionen ausgewählter dynamischer Tourenplanungsverfahren	110
Tab. 3-5	Einflussfaktoren auf die Dynamik eines Tourenplanungssystem	118
Tab. 4-1	Merkmale des in dieser Arbeit betrachteten Tourenplanungsproblems	134
Tab. 4-2	Ablauf des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger bei Änderung aktueller Zug erlaubt	150
Tab. 4-3	Ablauf des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger bei Änderung aktueller Zug verboten	150
Tab. 4-4	Ablauf des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung bei Änderung aktueller Zug erlaubt	155
Tab. 4-5	Ablauf des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung bei Änderung aktueller Zug verboten	157
Tab. 4-6	Ablauf des modifizierten Verfahrens von Christofides bei Änderung aktueller Zug erlaubt	162
Tab. 4-7	Ablauf des modifizierten Verfahrens von Christofides bei Änderung aktueller Zug verboten	163
Tab. 4-8	Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) bei Änderung aktueller Zug erlaubt	168
Tab. 4-9	Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) bei Änderung aktueller Zug verboten	170
Tab. 4-10	Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) bei Änderung aktueller Zug erlaubt	184
Tab. 4-11	Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) bei Änderung aktueller Zug verboten	186
Tab. 4-12	Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	193
Tab. 4-13	Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	195
Tab. 4-14	Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	197

Tab. 4-15	Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour	199
Tab. 4-16	DTSP Testauswertung - Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge erreicht?	213
Tab. 4-17	DTSP Testauswertung - Wie oft war jedes Verfahren bei Tourlänge am besten?	213
Tab. 4-18	DTSP Testauswertung - Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge besser?	214
Tab. 4-19	DTSP Testauswertung - Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden erreicht?	214
Tab. 4-20	DTSP Testauswertung - Wie oft war jedes Verfahren bei durchschnittlicher Wartezeit über alle Kunden am besten?	215
Tab. 4-21	DTSP Testauswertung - Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden besser?	215
Tab. 4-22	DTSP Testauswertung - Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden erreicht?	216
Tab. 4-23	DTSP Testauswertung - Wie oft war jedes Verfahren bei durchschnittlicher Wartezeit der dynamischen Kunden am besten?	216
Tab. 4-24	DTSP Testauswertung - Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden besser?	217
Tab. 4-25	DTSP Testauswertung - Wie oft war das Verfahren für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden bzw. über alle dynamischen Kunden identisch?	217
Tab. 4-26	DTSP Testauswertung - Variation Auftragseingangszeitraum und Operationsgebietsgröße	220
Tab. 4-27	DVRP Testauswertung - Tourlänge	222
Tab. 4-28	DVRP Testauswertung - Durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden	222
Tab. 4-29	DVRP Testauswertung - Durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden	223
Tab. 4-30	DVRP Testauswertung - Wie oft war das Verfahren für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden bzw. über alle dynamischen Kunden identisch?	223
Tab. A1-1	DTSP Testauswertung - Prozentuale Abweichung zwischen Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge	248
Tab. A1-2	DTSP Testauswertung - Prozentuale Abweichung zwischen Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden	248
Tab. A1-3	DTSP Testauswertung - Prozentuale Abweichung zwischen Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden	249
Tab. A1-4	DTSP Testauswertung - Durchschnittliche Tourlänge	249

Tab. A2-1	Koordinaten der statischen Kunden	250
Tab. A2-2	Koordinaten der dynamischen Kunden	250
Tab. A2-3	Vergleich der dynamischen Rundreiseverfahren anhand Beispiel Larsen	251
Tab. A2-4	Route nach Bester Nachfolger	253
Tab. A2-5	Route nach Savings-Verfahren	253
Tab. A2-6	Route nach Sukzessive Einbeziehung	254
Tab. A2-7	Route nach Verfahren von Christofides	254
Tab. A2-8	Rundreiselängen nach den modifizierten Verfahren bei Reduzierung des Problems	254
Tab. A5-1	Daten statische Kunden	259
Tab. A5-2	Daten dynamische Kunden	259
Tab. A5-3	Gefahrene Touren	260
Tab. A5-4	Ereignisse im dynamischen Tourenplanungsprozess bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens bei Variante <i>Änderung aktueller Zug möglich</i>	261
Tab. A5-5	Gefahrene Touren	262
Tab. A6-1	Tourenplan 1. Beispiel	263
Tab. A6-2	Tourenplan 2. Beispiel	264

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ADTSPTW	A-priori Dynamic Traveling Salesman Problem Time Window
AEZ	Auftragseingangszeitraum
AvD	Automobilclub von Deutschland
CPP	Chinese Postman Problem
DAB	Digital Audio Broadcasting
DOD	Degree Of Dynamism (Grad der Dynamik)
DSDPFV	Dynamisches speditionelles Dispositionsproblem mit Fremdvergabe
DSL	Digital Subscriber Line
DTP	Dynamische Tourenplanung
DTRP	Dynamic Traveling Repairman Problem
DTSP	Dynamic Traveling Salesman Problem
DTSPTW	Dynamic Traveling Salesman Problem Time Window
DVRP	Dynamic Vehicle Routing Problem
DVRPTW	Dynamic Vehicle Routing Problem Time Window
EDI	Electronic Data Interchange
EDOD	Effective Degree Of Dynamism
EDOD-TW	Effective Degree Of Dynamism - Time Window
FCFS-Strategie	First Come First Serve Strategie
Fzg.	Fahrzeug
GEN-Strategie	Generation Strategie
GIS	Geographic Information System
GK	Gesamtkunden
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IDN	Integrated Digital Network
i. d. R.	in der Regel
ISDN	Integrated Services Digital Network
IVHS	Intelligent Vehicle-Highway System
KEP	Kurier-, Express- und Paketsendungen
LE	Längeneinheiten
ME	Mengeneinheiten
MIP	Mixed Integer Program
MORSS	M.I.T. Ocean Routing and Scheduling System
MSC	Military Sealift Command
MPGA	Modificated Probabilistic Gradual Add
mod TSP-Strategie	Modifizierte Traveling Salesman Problem Strategie

NN-Strategie	Nearest Neighbour (Bester Nachfolger) Strategie
PART-Strategie	Partitioning Strategie
PDTRP	Partially Dynamic Traveling Repairman Problem
PGA	Probabilistic Gradual Add
PNN	Probabilistic Nearest Neighbour
PTSP	Probabilistic Traveling Salesman Problem
PVRP	Probabilistic Vehicle Routing Problem
P(VRP)	Problemklasse der statischen Tourenplanungsprobleme
P(DVRP)	Problemklasse der dynamischen Tourenplanungsprobleme
RDS/TMC	Radio Data System/ Traffic Message Channel
SEO	Single Event Optimization
SFC-Strategie	Space Filling Curve Strategie
SMS	Short Message System
SQM-Strategie	Stochastic Queue Median Strategie
SVRP	Stochastic Vehicle Routing Problem
TDTSP	Time-Dependent Traveling Salesman Problem
TDVRP	Time-Dependent Vehicle Routing Problem
TPDP	Truckload Pickup and Delivery Problem
TSP	Traveling Salesman Problem
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
ZE	Zeiteinheiten

Symbolverzeichnis

b_i	Bedarf des Kunden i
C	Bewertungsmatrix
c_{ij}	Bewertung der Kante $[i, j]$
cap_k	Kapazität des Fahrzeuges k
D	maximale Tourdauer
dod	degree of dynamism
E	Kantenmenge
\tilde{E}^*	minimales Summen-Matching
$E[Z]$	Erwartungswert der Zufallsvariable Z
e_i	früheste Ankunftszeit beim Kunden i
$edod$	effective degree of dynamism
$edod-tw$	effective degree of dynamism time window
F	Menge der Fahrzeuge
$f(n)$	Funktion
G	Graph
g	Geschwindigkeit der Fahrzeuge
K	Kurzurndreise
KG_i	Knotengrad des Knoten i
L	Rundreiselänge bzw. Tourlänge
L_T	Tourlänge der Tour T
l_i	späteste Ankunftszeit beim Kunden i
λ	Ankunftsrate der Kunden
M	Menge der Matchingknoten
$MSST$	modifiziertes Minimalgerüst
m	Fahrzeuganzahl
N	Menge der natürlichen Zahlen
n	Anzahl Knoten bzw. Kunden
n_{total}	Gesamtkundenanzahl
n_d	Anzahl dynamische Kunden
n_s	Anzahl statische Kunden
$O(f(n))$	Größenordnung des Rechenaufwandes
$P(Z)$	Wahrscheinlichkeit der Zufallsvariable Z
PH	Länge des Planungshorizontes
p_i	Auftrittswahrscheinlichkeit des Kunden i

Q	Fahrzeugkapazität
$q(T_i)$	Kapazitätsbedarf der Tour i
R	Rundreise
$R(n)$	Rechenaufwand (bzw. Zeitkomplexität) zur Lösung eines Optimierungsproblems
r_i	Reaktionszeit für Kunde i
S	Menge der Startknoten
SST	Minimalgerüst (Shortest Spanning Tree)
$SysZ_i$	Systemzeit des Kunden i
SZ_i	Standzeit des Fahrzeuges beim Kunden i
s	Startknoten
s_{ij}	Savingswert zwischen den Kunden(Knoten) i und j
T_i	Tour i
TA	Tourenanzahl eines Tourenplans
t_{ij}	Fahrzeit von Kunde i nach j
V	Knotenmenge
v_i	Knoten
W_i	Wartezeit des Kunden i
x_{ij}, y_{ik}	Binärvariable
(x_i, y_i)	Koordinaten des Kundenstandortes i
Z	Zufallsvariable bzgl. der aufgetretenen Kunden an einem Tag
ZP	Zeitpunkt
z	Realisation von Z
\succ	„besser als“
\emptyset	leere Menge

1 Einleitung

1.1 Motivation

Stark gestiegene Leistungs- und Qualitätsansprüche der Verladerschaft und deren Kunden sowie der in globalen Logistik- bzw. Distributionsnetzwerken wachsende Einfluss der Faktoren Unsicherheit und Ungewissheit implizieren neue Herausforderungen an die Tourenplanung. Immer öfter treffen neue oder weitere Informationen, wie geänderte Liefermengen und -adressen, neue Kundenaufträge oder Daten zu aktuellen Verkehrsverhältnissen, während der Ausführung der geplanten Touren ein. Die Verarbeitung all dieser Daten kann relevant dafür sein, ob der Service den Kundenerwartungen entspricht und die eigenen Kosten optimiert werden. Die Mehrzahl der deterministisch statisch orientierten Tourenplanungsverfahren, denen die Annahme zugrunde liegt, dass die Daten für die Planung im Vorhinein mit Sicherheit bekannt sind und sich nach ausgeführter Planung nicht mehr ändern, entsprechen nicht den tatsächlichen Bedingungen der dynamischen Umwelt. Infolgedessen sollte eine dynamische Tourenplanung zum Einsatz kommen. Dynamische Tourenplanung bedeutet Tourenplanung, bei der nicht alle Informationen vor dem Planungsprozess bekannt sind und dass Modifikationen am Tourenplan durchgeführt werden, da sich die Informationen, nachdem die Touren geplant wurden, ändern können. Ein Planungsalgorithmus für die dynamische Tourenplanung muss die Rahmenbedingungen, dass zum Startzeitpunkt der Fahrzeuge am Depot noch nicht alle Daten vorliegen und die Validierung neuer Daten parallel zur Ausführung der Touren erfolgt, beachten. Denn die in dieser Arbeit betrachtete Problemstellung der operativen Transportdisposition, deren primäre Aufgabe in der täglichen Organisation von Touren zur Erfüllung vorgegebener Transportaufträge besteht, erreicht nur dann einen sehr hohen Servicegrad, wenn sie die dynamischen Aspekte der Planungsaufgabe in ausreichendem Maße berücksichtigt. Die aktive und vorausschauende Einplanung kurzfristig auftretender Änderungen im Tourverlauf sowie die flexible Berücksichtigung dynamisch eingehender Transportaufträge stellen aber höchste Anforderungen an die Geschwindigkeit des Lösungsverfahrens und die effiziente Ausgestaltung von auf Transport- und Lieferketten beruhenden Informationsketten. Des Weiteren erhöht sich bei der dynamischen Tourenplanung auch die Planungskomplexität.

Die rasante Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien, speziell der Datenaustausch zwischen Fahrer und Dispositionszentrale, haben die Bedeutung der Informationslogistik entscheidend verstärkt sowie die kontinuierliche Aktualisierung von Planungsdaten erleichtert. Des Weiteren führt der Anstieg der Leistungsfähigkeit von Computern und Speichermedien dazu, dass die Bestimmung von Planungsergebnissen viel schnell-

ler und in kürzeren Zeitabständen möglich ist. Darüber hinaus können dadurch wesentlich größere Datenmengen bewältigt und gespeichert werden. Somit ist die Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen (z. B. Veränderung der Planungsdaten im Zeitablauf), der Einsatz verbesserter Algorithmen und die Verringerung der Planungsintervalle, d. h. die häufigere Anwendung eines Planungstools, anzustreben. Verbesserte Planungssysteme sollen demnach beispielsweise die Dynamik der Umwelt abbilden und berücksichtigen können. Die folgenden vier Aussagen bekräftigen diesen Anspruch:¹ Erstens gewinnt eine effiziente Tourenplanung mit der Öffnung der Märkte und der Globalisierung mehr und mehr an Bedeutung. Zweitens ist der ökonomische Nutzen bzw. das Kostensenkungspotenzial, bei verbesserter Wirtschaftlichkeit von Distributionssystemen in einem dynamischen Umfeld, beachtlich. Drittens sind real-time Planungssituationen, bei denen ständig neue Informationen dem Entscheider zugehen, in Zukunft die Regel, ermöglicht z. B. durch ständig weiterentwickelte Informations- und Kommunikationstechnologien, veränderte Kundenanforderungen oder kürzere Dispositionszyklen. Viertens ist die Aufnahme und Verarbeitung von dynamischen Daten möglich und erforderlich geworden, nicht zuletzt um im Wettbewerb zu bestehen.

Ferner führt der in den letzten Jahren verstärkte Fokus auf Just-in-time-Logistik² zu einer erhöhten Aufmerksamkeit bezüglich einer Tourenausführung, die kurzfristig auftretende Änderungen berücksichtigt und Zeitrestriktionen einhält sowie kostengünstig erfolgt. Die Verringerung von Distributionskosten, zu der auch eine effiziente Tourenplanung beitragen kann, hat für viele Unternehmen eine große Bedeutung, da die Distributionskosten 10-15 % des Bruttozialproduktes eines Landes betragen.³ So können bereits geringe Kostensenkungen für einzelne Industriezweige von entscheidender Bedeutung sein. Durch den ständig zunehmenden Verkehr sind vor allem Ballungsgebiete durch erhöhtes Verkehrsaufkommen und Staus gekennzeichnet. Neben intelligenten Verkehrsleitsystemen kann auch von Tourenplanungstools gefordert werden, solche dynamischen Umfeldbedingungen zu beachten. In Deutschland entsteht nach Angaben des Institutes der deutschen Wirtschaft durch die zugenommene Verkehrsdichte und die dadurch hervorgerufenen Staus ein jährlicher Verlust durch Wartezeiten von ungefähr 4,4 Milliarden Autostunden, wobei die Tendenz weiter steigend ist.⁴

¹ Vgl. Psaraftis, H. (1995), S. 144 und Bianchi, L. (2000), S. 2.

² Vgl. Fullerton, R. et al. (2003), S. 383 f. und White, R. et al. (1999), S. 1 f.

³ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 12.

⁴ Vgl. IWD (1999), Nr. 30. Die landesweite Wartezeit in den USA betrug 1992 4,0 Milliarden Autostunden pro Jahr. Für 2005 werden 8,0 Milliarden Autostunden Wartezeit pro Jahr prognostiziert. Vgl. dazu Haghani, A. et al. (2003), S. 3.

Aus Sicht des Verfassers kann die Qualität der Tourplanungsergebnisse durch die zeitnahe Berücksichtigung unvorhergesehener Ereignisse nachhaltig verbessert werden. Jedoch findet diese zunehmend erfolgskritische Funktionalität interessanterweise in der Literatur bisher nur unzureichend Beachtung, obwohl das Tourenplanungsproblem (Vehicle Routing Problem (VRP)) eines der wichtigsten und am meisten erforschten kombinatorischen Optimierungsprobleme ist. Verfahren für kapazitierte dynamische Tourenplanungsproblemstellungen sind in der Literatur kaum zu finden.⁵ Algorithmen, die darüber hinaus eine große Lösungsgeschwindigkeit, eine leichte Verständlichkeit, eine aus praktischer Sicht akzeptable Lösungsgüte aufweisen und die Möglichkeit besitzen, die aktuellen Routenpläne der Fahrzeuge ausgehend von der momentanen geographischen Position real-time zu verändern, existieren nicht.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

In der Praxis können fast alle Parameter dynamischer Natur sein. In dieser Arbeit wird der Untersuchungsbereich auf das kapazitierte dynamische Tourenplanungsproblem beschränkt. Dabei erfolgt nur eine Betrachtung der Dynamik bezüglich der Anzahl der zu bedienenden Kunden. Ein dynamischer Kunde ist aus Vereinfachungsgründen mit einem dynamischen Kundenauftrag gleichzusetzen. Die vorliegende Arbeit stellt ein Konzept vor, das die Disposition dynamischer Kunden effizient löst. Das Konzept basiert auf einer rollierenden Planung, bei der ein Teilproblem des gesamten Dispositionsprozesses immer dann zu lösen ist, wenn ein neuer dynamischer Kunde auftritt. Schwerpunkt der Arbeit ist, speziell für die Lösung der Teilprobleme Verfahren zu entwickeln sowie die mathematische Formulierung der Teilprobleme. Dabei erfolgt sowohl die Betrachtung von Verfahren zur Lösung des Tourenplanungsproblems als auch von Verfahren zur Lösung des Traveling Salesman Problems. Zum einen ist das Traveling Salesman Problem ein Teilproblem des Tourenplanungsproblems und zum anderen kommen Algorithmen zur Lösung des Traveling Salesman Problems im Rahmen der Tourenplanung z. B. bei zweistufigen Verfahren zum Einsatz. Die besondere Schwierigkeit bei der Konzeption der neuen Verfahren stellt die Beachtung der aktuellen geographischen Positionen und Restkapazitäten der Fahrzeuge dar. Hierbei differenzieren sich die in dieser Arbeit neu entwickelten Verfahren von bereits existierenden Algorithmen, indem sie für das kapazitierte dynamische Tourenplanungsproblem bzw. für das dynamische Traveling Salesman Problem die Option enthalten, bereits ab der aktuellen Fahrzeugposition den Tourenplan zu modifizieren. Bisherige Verfahren erlauben eine Änderung des Tourenplans

⁵ Das kapazitierte dynamische Tourenplanungsproblem betrachten LUND et al., LARSEN und LACKNER. Vgl. Lund, K. et al. (1996), Larsen, A. (2001) und Lackner, A. (2003).

erst ab dem durch das Fahrzeug angesteuerten Kunden, d. h. das Teilstück zwischen aktueller Fahrzeugposition und nächstem Kunden ist unveränderlich. Da dynamische Kunden dadurch gekennzeichnet sind, dass sie parallel zur Ausführung des Tourenplans erscheinen, befinden sich zum Auftrittszeitpunkt eines dynamischen Kunden einige oder alle Fahrzeuge nicht am Depot, sondern dementsprechend an verschiedenen geographischen Punkten im Operationsgebiet. Lediglich ICHOUA et al. analysieren die Möglichkeit, den aktuellen Fahrzeugzug zu verändern.⁶ Allerdings werden bei ICHOUA et al. keine Fahrzeugkapazitäten berücksichtigt und die verwendete Lösungsmethodik ist durch den Einsatz einer Metaheuristik deutlich komplexer sowie dementsprechend für den Anwender schwieriger nachvollziehbar als die hier in dieser Arbeit vorgestellten Lösungskonzepte. Zudem müssen aufgrund der längeren Rechenzeit der Metaheuristik im Rahmen des Lösungsalgorithmus die bei Beendigung des Algorithmus gültigen Fahrzeugpositionen prognostiziert werden, da die Fahrzeuge während der Kalkulationszeit ihre Position i. d. R. verändern. Eine weitere Schwierigkeit die bei der Konstruktion neuer Verfahren zu beachten ist, stellt die jeweilige momentane Restkapazität eines jeden Fahrzeuges dar, die in Abhängigkeit der bis zum Auftrittszeitpunkt eines dynamischen Kunden bedienten Kunden durch das betreffende Fahrzeug variiert.

In Bezug auf die zuvor erörterten Besonderheiten bzw. Schwierigkeiten bei der Lösung von kapazitierten dynamischen Tourenplanungsproblemen, die Schwächen der bisherigen Verfahren, die keine Möglichkeit bieten die Änderung der aktuellen Fahrzeugzüge bei kapazitierten Tourenplanungsproblemen vorzunehmen, sowie um Anforderungen der Praxis (Nachvollziehbarkeit der Planungsalgorithmus und Interaktionsmöglichkeiten) und Rahmenbedingungen der dynamischen Tourenplanung (kurze Rechenzeiten) zu beachten, wird für die Arbeit folgende Forschungsfrage formuliert:

Wie ist ein Verfahren für die dynamische Tourenplanung zu konstruieren, welches das kapazitierte dynamische Tourenplanungsproblem mit der Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges unter Einhaltung sehr kurzer Rechenzeiten bei größtmöglicher Verständlichkeit löst?

Durch die genannten Kriterien sehr kurze Rechenzeiten und größtmögliche Verständlichkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst der Schwerpunkt auf die Modifikation von klassischen Eröffnungsheuristiken für die Lösung von dynamischen Tourenplanungsproblemen gelegt. Denn es sollen als Ziele verfolgt werden, dass bei bekannt werden von dynamischen Kundenaufträgen schnellstmöglich ein neuer gültiger Tourenplan konstruiert werden kann

⁶ Bei ICHOUA et al. werden keine Fahrzeugkapazitäten berücksichtigt, da ICHOUA et al. den Transport von kleinen Sendungen im KEP-Bereich betrachten, die die Kapazität eines ganzes Fahrzeuges nicht überschreiten. Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 430.

sowie dass Anwender und Implementierer der Verfahren diese leicht nachvollziehen können. Die Anwendung von Metaheuristiken ist nur bedingt möglich, da es zum einen zu beachten gilt, dass Metaheuristiken trotz immer schnellerer Computerleistungen Lösungen im Minutenbereich bestimmen,⁷ und zum anderen die Nachvollziehbarkeit der Metaheuristiken i. d. R. erhebliche Kenntnisse voraussetzt. Ferner kann bei der Verwendung von Metaheuristiken ein relativ großer Anpassungsaufwand an das genaue Problem entstehen und eine genaue Justierung von Verfahrensparameter ist erforderlich.⁸ Infolgedessen soll in dieser Arbeit die Modifizierung von klassischen Heuristiken erfolgen.

Eine softwaretechnische Implementierung der entwickelten Verfahren ist ebenfalls Ziel dieser Arbeit. Damit kann die potentielle Anwendung der neuen Verfahren in der Praxis getestet werden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Zusammenhang mit dem zuvor erörterten Schwerpunkt der Arbeit auch mit den technischen Voraussetzungen, z. B. verschiedensten Telematikkomponenten, die zur Umsetzung des Gesamtkonzeptes notwendig sind, um die praktische Anwendbarkeit zu erleichtern. Das in der Arbeit vorgestellte Konzept ermöglicht dadurch eine dynamische Tourenplanung, d. h. eine Echtzeitdisposition von dynamischen Kunden unter Einsatz telematischer Komponenten. Da die dynamische Tourenplanung ein noch relativ junges Wissenschaftsgebiet ist, gilt es, auch die vergleichsweise wenige und zum Teil sehr heterogene Literatur zu systematisieren und zu ergänzen. Beispielsweise werden hier verschiedenste Definitionsansätze verglichen und elementare Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung aufgezeigt.

Der Aufbau der Arbeit gestaltet sich anhand der geschilderten Zielstellungen wie folgt. Kapitel zwei behandelt Grundlagen der Tourenplanung einschließlich ihres Bezuges zur dynamischen Tourenplanung. Dies beinhaltet anfänglich die aktuellen Entwicklungen im Güterverkehr und deren Ursachen. Die Gründe der Entwicklungen werden aus dem Güterstruktur-, dem Logistik-, dem Integrations- und dem Schnittstelleneffekt sowie aus den Systemvorteilen des Straßengüterverkehrs abgeleitet. Ferner zeigen die Systemvorteile und die daraus resultierenden Haupteinsatzfelder des Straßengüterverkehrs, warum sich die Arbeit schwerpunktmäßig mit der dynamischen Tourenplanung im Straßengüterverkehr befasst. Danach erfolgt die Einordnung der Tourenplanung innerhalb der betriebswirtschaftlichen Logistik bzw. der Distributionslogistik. Darüber hinaus wird der Begriff "Tourenplanung" allgemein und das Standardproblem der Tourenplanung erklärt sowie eine Reihe weiterer spezieller Prob-

⁷ Vgl. dazu die Ergebnisse der empirischen Tests von Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 519 und Laporte, G. et al. (2000), S. 297.

⁸ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59.

lemstellungen aufgezeigt und eine Kurzdefinition zur dynamischen Tourenplanung angegeben. Die der Tourenplanung zugrundeliegenden mathematischen Modelle und die wichtigsten Lösungsverfahren werden vorgestellt bzw. Besonderheiten oder ausgewählte Algorithmen im Hinblick auf die Wichtigkeit für folgende Kapitel erklärt. An entsprechenden Textstellen erfolgen bereits Verweise auf die dynamische Tourenplanung, um die hier betrachteten Grundlagen der Tourenplanung mit dem Kern der Arbeit, der dynamischen Tourenplanung, zu verknüpfen.

Grundlagen der dynamischen Tourenplanung sind Gegenstand von Kapitel drei. Schwerpunkte dieses Kapitels sind die Definition der dynamischen Tourenplanung und der Vergleich verschiedenster Definitionen aus der Literatur, die Darstellung von wesentlichen Unterschieden zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung sowie eine Beschreibung der wichtigsten bislang erschienen Werke zur dynamischen Tourenplanung. Außerdem werden Anwendungsgebiete und Algorithmen zur Lösung dynamischer Problemstellungen vorgestellt. Ferner erfolgt die Beschreibung von telematischen Komponenten, die die nachhaltige Umsetzung einer dynamischen Tourenplanung und speziell der in Kapitel vier vorgestellten neuen Verfahren begünstigen. Denn wie anhand der aktuellen Entwicklungen im Güterverkehrssektor beschrieben, müssen neben der Gestaltung einer effizienten Tourenplanung und Transportabwicklung auch verstärkt Maßnahmen zur Optimierung, Rationalisierung und Qualitätsverbesserung der Informationsflüsse ergriffen werden.

Die Vorstellung der durch den Autor neu entwickelten Lösungsverfahren und deren Einbettung in ein Gesamtkonzept zur Disposition dynamischer Kunden ist Gegenstand von Kapitel vier. Dabei findet zunächst die Beschreibung des allgemeinen Ablaufes des Konzeptes statt, bevor in weiteren Unterkapiteln neue konkrete Modelle und Verfahren zur Lösung von Subproblemen innerhalb des Gesamtkonzeptes dargestellt werden. Eine Vorstellung von speziell zum Test der neuen Lösungsalgorithmen entwickelten Softwareprogramme erfolgt ebenfalls. Zum Vergleich der neu konzipierten Verfahren untereinander wurden vielfältige Szenarien mittels der Softwareprogramme simuliert.

Kapitel fünf fasst wesentliche Erkenntnisse und Inhalte der Arbeit zusammen. Ferner wird weiterer Forschungsbedarf dargestellt.

Zur wissenschaftstheoretischen Einordnung sowie zur gewählten Forschungsmethodik der Arbeit lässt sich ergänzen, dass die vorliegende Arbeit in den Bereich der angewandten Realwissenschaften⁹ einzuordnen ist, da im Rahmen der Arbeit die Beschreibung und Gestaltung von Praxisproblemstellungen erfolgt, für die Handlungsoptionen bestimmt werden

⁹ Vgl. Ulrich, P./ Hill, W. (1979), S. 161 ff.

sollen. Der Forschungsprozess bei der anwendungsorientierten Wissenschaft beginnt bei den Problemen der praktisch handelnden Menschen, für deren Lösung kein befriedigendes Wissen zur Verfügung steht, und nicht im Theoriezusammenhang. Im Rahmen dieser angewandten Forschung erfolgt die Modellierung der betrachteten Problemstellungen und deren Entscheidungsunterstützung,¹⁰ was in der Arbeit in Kapitel vier durch die formale Beschreibung der betrachteten Problemstellung und der Vorstellung von Lösungsverfahren geschieht. Zudem ist es Ziel, eine möglichst hohe Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse zu gewährleisten. Diesem Ziel soll das hohe Maß an Verständlichkeit der in Kapitel vier vorgestellten Verfahren sowie die softwaretechnische Umsetzung Rechnung tragen.

Für die hier aufgezeigte Forschungskonzeption sind drei verschiedene Zielsetzungen maßgeblich – das deskriptive, das theoretische und das pragmatische Wissenschaftsziel,¹¹ wobei der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem pragmatischen Wissenschaftsziel liegt. Das deskriptive Wissenschaftsziel dient der Beschreibung der veränderten Rahmenbedingungen in der Transportbranche und Anforderungen an die Transportunternehmen aus dem nicht zuletzt die Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit der dynamischen Tourenplanung begründet werden kann. Als wissenschaftstheoretisches Ziel steht die Erklärung der Aufgaben und Ansätze sowie die Weiterentwicklung der Theorie der dynamischen Tourenplanung im Vordergrund. Die theoretische Durchdringung der Themenstellung ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche praktische Gestaltung.

Das pragmatische Wissenschaftsziel¹² dieser Arbeit beinhaltet die Entwicklung geeigneter Modelle und Verfahren für die Anwendung dynamischer Tourenplanung in der Praxis sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für den Einsatz in der betrieblichen Praxis. Insgesamt entsteht ein Instrumentarium, das Disponenten darin unterstützt, Tourenplanungsentscheidungen strukturiert und umfassend vorzubereiten und zu treffen. Erarbeitete Modelle und Verfahren werden numerischen Tests unterzogen. Im Rahmen des pragmatischen Wissenschaftsziels soll dementsprechend in geeigneter Art und Weise eine Unterstützung von Gestaltungsentscheidungen erfolgen. Der Zweck der Verfolgung aller genannten Wissenschaftsziele ist, eine Kooperation von Wissenschaft und Unternehmenspraxis zu ermöglichen.¹³ Daher muss, sowohl die wissenschaftliche als auch die pragmatische Argumentationsrichtung auf einander abgestimmt und empirisch getestet werden. In dieser Arbeit sollen zumindest die softwaretechnische Umsetzung der Lösungsverfahren und die durchgeführten numerischen Tests dieser Forderung Rechnung tragen.

¹⁰ Vgl. Ulrich, H. (1984), S. 200 ff.

¹¹ Vgl. Chmielewicz, K. (1994), S. 8 ff.

¹² Vgl. Grass, B. (2003), S. 28 ff.

¹³ Vgl. Stählin, W. (1973), S. 25 ff.

2 Grundlagen der Tourenplanung

Der Tourenplanung kommt ganz allgemein die Aufgabe zu, kleinere Transportaufträge, die die Kapazität eines Fahrzeugs nicht ausschöpfen, zu Touren zusammenzufassen, wobei ein Zielkriterium, wie z. B. die insgesamt zurückzulegende Entfernung ist zu minimieren, verfolgt wird. In welchem Bereich der Unternehmenslogistik die Tourenplanung angesiedelt ist, welche Bedeutung ihr zukommt und wie sie definiert wird sowie Bedeutung und Entwicklung des Straßengüterverkehrs, behandelt dieses Kapitel am Anfang. Eine detaillierte Beschreibung der Problemstellung der Tourenplanung und Klassifizierungsmöglichkeiten von Tourenplanungsproblemen sowie verschiedene Zielstellungen, die bei der Lösung von Tourenplanungsproblemen verfolgt werden können, schließen sich an. Ferner erfolgen kurz einige Ausführungen zur Komplexität der Tourenplanung und zum Softwareeinsatz für die Lösung von Tourenplanungsaufgaben. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Tourenplanung innerhalb dieses Kapitels grundsätzlich unter statischen Gesichtspunkten betrachtet wird, d. h. es findet zunächst die Darstellung der klassischen Tourenplanung statt, allerdings erfolgen an entsprechenden Textstellen bereits Verweise zur dynamischen Tourenplanung, da sie aus Sicht des Autors zum besseren Verständnis der Arbeit beitragen. Dieses Kapitel endet mit der Vorstellung der wichtigsten Modelle und Verfahren zur statischen Tourenplanung.

2.1 Bedeutung und Entwicklung des Straßengüterverkehrs

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Entwicklung des Straßengüterverkehrs und dessen Eignung speziell für eine dynamische Tourenplanung betrachtet. Neben dem wechselseitigen Zusammenspiel von Güterstruktur- und Logistikeffekt, die zusätzlich zum allgemeinen Wachstum der Volkswirtschaft einen kontinuierlichen Anstieg des gesamtwirtschaftlichen Verkehrsaufkommens bewirken, führen der Güterstruktur- und der Logistikeffekt auch zu starken Anteilsverschiebungen zugunsten des Straßengüterverkehrs im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern, wie im Folgenden erklärt wird. Des Weiteren resultieren aus der qualitativ und quantitativ geänderten Transportnachfrage der Verlagerer neue und erhöhte Anforderungen an Transportunternehmen. Diese Anforderungen implizieren eine besonders große Affinität zum Straßengüterverkehr. Auch darauf wird in diesem Kapitel eingegangen.

Über die vergangenen 50 Jahre weist der deutsche Binnengüterverkehr einen positiven Wachstumstrend auf. Ursachen dafür sind neben einem anhaltenden Wirtschaftswachstum die zunehmende internationale Arbeitsteilung im EG-Binnenmarkt und weltweit sowie seit 1990 der deutsche Einigungsprozess und die Öffnung Osteuropas. Wie Abbildung 2-1, die

die Entwicklung des binnenländischen Güterverkehrsaufkommens¹⁴ von 1950 bis 2005 enthält, und Abbildung 2-2, die die Entwicklung der binnenländischen Güterverkehrsleistung¹⁵ von 1950 bis 2005 enthält, zeigen, kam jedoch nahezu der gesamte binnenländische Güterverkehrszuwachs dem Straßengüterverkehr zugute. Tabelle 2-1 verdeutlicht nochmals, wie stark sich die Ladungsanteile über die letzten 55 Jahre zugunsten des Straßengüterverkehrs verschoben haben.

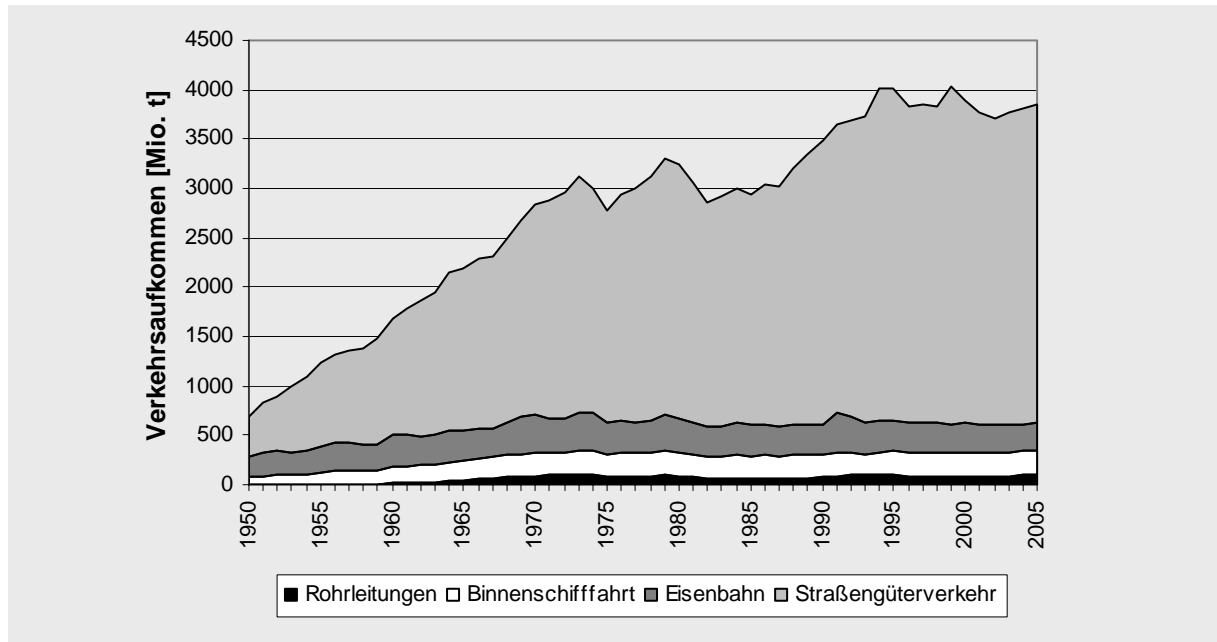


Abb. 2-1: Binnenländisches Güterverkehrsaufkommen 1950 bis 2005

Quelle: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (Hrsg.) (2004)

Hinweis: Die Werte von 2002-2005 beruhen auf Schätzungen.

Der aufgezeigte Wachstumstrend des deutschen Binnengüterverkehrs soll sich auch weiterhin fortsetzen. Nach der "Verkehrsprognose 2015" des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen wächst der Straßengüterverkehr beim Güterverkehrsaufkommen um 26 % und die Güterverkehrsleistung um 68 % jeweils von 1997 bis 2015 (1997 ist Bezugszeitpunkt für die Verkehrsprognose 2015).¹⁶ Vom gesamten Wachstum des Güterverkehrs von 1997 bis 2015 entfallen damit 91 % der Zunahme des Güterverkehrsaufkommens und 82 % der Zunahme der Güterverkehrsleistungen auf den Straßengüterverkehr.

¹⁴ Das Güterverkehrsaufkommen stellt als verkehrstatistische Kenngröße die Menge der in einem bestimmten Zeitraum beförderten Güter in Tonnen außerhalb von Betriebsgeländen dar. Synonym erfolgt auch die Verwendung des Begriffes "Transportaufkommen". Vgl. Bloech, J./ Ihde, G. (1997), S. 1140 und Buchholz, J. et al. (1998), S. 3.

¹⁵ Die Güterverkehrsleistung als verkehrstatistische Kenngröße ist das Produkt aus Verkehrsaufkommen und Wegelänge bzw. Transportweite jeder Ostveränderung von Gütern in einem bestimmten Zeitraum. Sie wird in Tonnenkilometern [tkm] angegeben und auch als Transportleistung bezeichnet. Vgl. Bloech, J./ Ihde, G. (1997), S. 1189 und Buchholz, J. et al. (1998), S. 3.

¹⁶ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (Hrsg.) (2001), Verkehrsprognose 2015, S. 221.

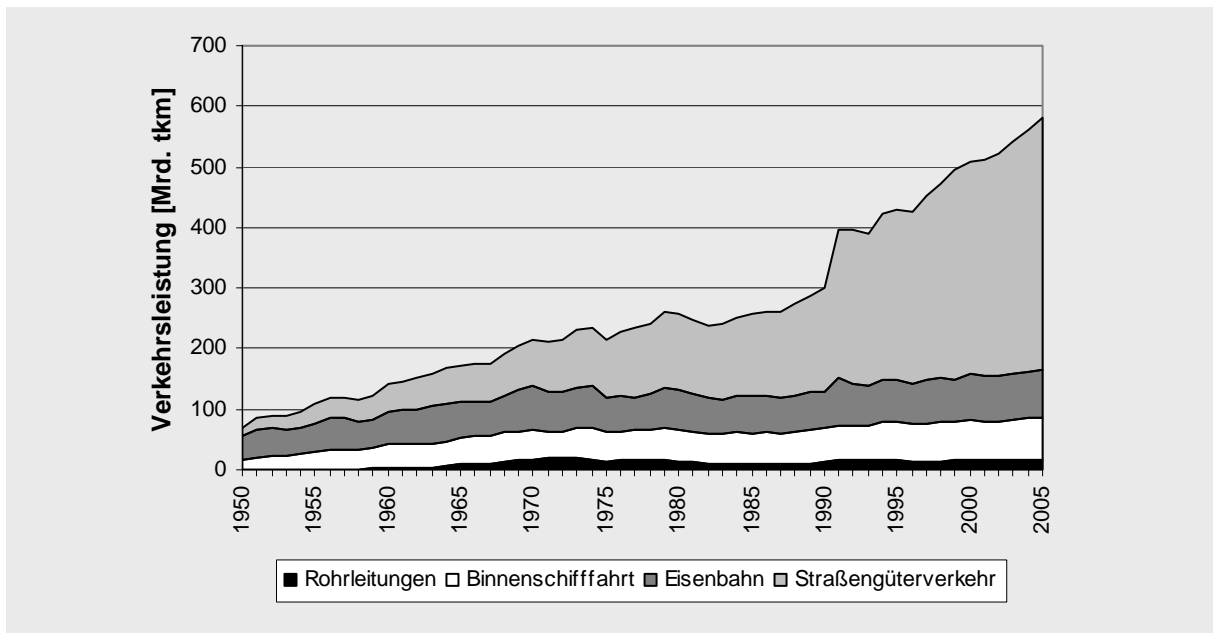


Abb. 2-2: Binnenländische Güterverkehrsleistung 1950 bis 2005

Quelle: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (Hrsg.) (2004)
Hinweis: Die Werte von 2002-2005 beruhen auf Schätzungen.

Verkehrsträger	Anteil am Verkehrsaufkommen [%]			Anteil an der Verkehrsleistung [%]		
	1960	2005	+/- [%]	1960	2005	+/- [%]
Straßengüterverkehr	70,3	83,8	+ 19,2	32,0	71,5	+ 123,4
Eisenbahn	18,7	7,2	- 61,5	37,4	13,6	- 63,6
Binnenschifffahrt	10,2	6,6	- 35,3	28,5	12,1	- 57,5
Rohrleitungen	0,8	2,4	+ 200,0	2,1	2,8	+ 33,3

Tab. 2-1: Anteilsverschiebung im Binnengüterverkehr von 2005 gegenüber 1960

Quelle: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (Hrsg.) (2004)

Erfolgt eine Betrachtung der Entwicklung differenziert nach Gütergruppen, zeigt sich, dass Fahrzeugen, Maschinen, Halb- und Fertigwaren der größte Zuwachs am binnenländischen Verkehrsaufkommen prognostiziert wird (vgl. Tab. 2-2).

Gütergruppe	Güterverkehrsaufkommen [Mio. t]					Prozentuale Veränderung			
	2001	2002	2003	2004	2007	01-02	02-03	03-04	04-07
Fahrzeuge, Maschinen, Halb- und Fertigwaren	607	597	642	664	729	-1,7	7,6	3,4	3,2
Eisen, Stahl und NE-Metalle	170	161	164	165	159	-5,4	2,2	0,4	-1,2
Land- und Forstwirtschaft, Nahrungs- und Futtermittel	543	539	552	558	592	-0,7	2,4	1,0	2,0
Erze und Metallabfälle	105	101	99	98	88	-3,7	-2,6	-1,1	-3,6
Feste mineralische Brennstoffe	101	100	98	95	91	-0,9	-2,2	-2,7	-1,6
Steine und Erden	1604	1493	1380	1337	1303	-6,9	-7,5	-3,1	-0,9
Düngemittel und Chemische Erzeugnisse	316	307	315	323	341	-3,0	2,9	2,3	1,9
Erdöl, Mineralölerzeugnisse, Gase	284	263	265	261	257	-7,4	0,8	-1,6	-0,5

Tab. 2-2: Erwartetes Güterverkehrsaufkommen nach Gütergruppen 2007 (Prognosen kursiv)

Quelle: Prog Trans (2004), S. 27.

Der Straßengüterverkehr weist einen besonders großen Anteil bei Fahrzeugen, Maschinen und Halb- und Fertigfabrikaten sowie Nahrungs- und Futtermitteln im Verhältnis zu anderen Verkehrsträgern auf.¹⁷ Dies lässt auf die Wichtigkeit eines hohen Lieferservicegrades, d. h. kurze Warte- und Lieferzeiten, schließen.¹⁸ Die geschilderten Entwicklungen verdeutlichen zugleich die Bedeutung einer effizienten Tourenplanung respektive sogar einer dynamischen Tourenplanung.

Der heutige Binnengüterverkehrsmarkt wird, wie gezeigt, klar vom LKW-Verkehr dominiert. Dabei profitierte der Straßengüterverkehr in der Vergangenheit vor allem von Veränderungen der Güterstruktur sowie der Einführung neuartiger Transport- und Logistikkonzepte, wodurch er der Bahn und der Binnenschifffahrt erhebliche Marktanteile abnehmen konnte. Der zuerst genannte Aspekt wird als Güterstruktureffekt bezeichnet, während der zuletzt erwähnte Sachverhalt den sogenannten Logistikeffekt darstellt.¹⁹

Für den **Güterstruktureffekt** ist zum einen die Ausdehnung räumlicher Produktions- und Marktverflechtungen verantwortlich, die durch Produktivitätssteigerungen aufgrund vertiefter Arbeitsteilung und damit verbundener Spezialisierungsvorteile die Verantwortung für eine wachsende Gesamtwirtschaft trägt.²⁰ Zum anderen wird der Güterstruktureffekt durch eine zunehmende Umschichtung des Sozialproduktes von geringwertigeren, material- und energieintensiven Gütern hin zu hochwertigeren, dienstleistungs- und forschungsintensiven Produkten mit fortschreitendem Übergang in die Dienstleistungsgesellschaft hervorgerufen. Ferner sei noch die in hoch entwickelten Volkswirtschaften zu beobachtende sukzessive Bedarfssättigung und Variantenvielfalt als Grund dafür genannt, dass Massengüter Anteile verlieren. Nach dem Güterstruktureffekt hat sich der Anteil hochwertiger, kundennaher, eilbedürftiger und in kleineren Sendungsgrößen anfallender Güter deutlich gegenüber dem Anteil geringwertigerer, rohstoffnaher, transportkostenintensiver Massengüter erhöht, eine Entwicklung, die insbesondere dem Straßengüterverkehr entgegen kam.²¹ Die systemgebundenen Streckenverkehrsträger Bahn und Binnenschiff entsprachen den gestiegenen Flexibilitätsanforderungen der zunehmend individualisierten Transportwege mit abnehmenden Bündelungsmöglichkeiten immer weniger und erlitten klare Anteilsverluste am Güterverkehrsmarkt.²² Die Atomisierung der Güterstruktur unterstützt diese Tendenzen.

¹⁷ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 94.

¹⁸ Vgl. Elbert, R./ Gomm, M. (2003), S. 92 f.

¹⁹ Vgl. Bloech, J./ Ihde, G. (1997), S. 1022 und Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001) S. 267.

²⁰ Vgl. Behnke, N. C. (1997), S. 70 ff. sowie Läpple, D. (1995), S. 13 f.

²¹ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 94 sowie Elbert, R./ Gomm, M. (2003), S. 90 f.

²² Vgl. Läpple, D. (1995), S. 290.

Der als zweites angesprochene Aspekt, der **Logistikeffekt**, basiert auf Anteilsverschiebungen, die durch veränderte Transportanforderungen vieler Unternehmen hervorgerufen wurden. Diese veränderten Transportanforderungen resultieren aus der Hinwendung der Verlagerer zu modernen Logistikkonzepten.²³ Darunter sind zum einen verschiedenste logistische Optimierungsstrategien, wie die Verringerung der Fertigungstiefe, die Konzentration auf Kernkompetenzen und die unternehmensübergreifende Flussorientierung, die zu hochgradig arbeitsteiligen Unternehmensnetzwerken mit erhöhtem Transportbedarf führen, zu verstehen. Zum anderen zählen dazu auch Strategien, wie der Abbau kapitalintensiver Bestände sowie die bedarfsgerechte, produktionssynchrone Beschaffung und Distribution, die immer kleinere Transportlosgrößen bei immer höheren Lieferfrequenzen mit sich bringen. Der Logistikeffekt ergibt sich somit auch aus der geforderten Verknüpfung von Prozessen zu Logistikketten.²⁴

Besonders die Flexibilitätsvorteile des LKWs sind die wesentlichste Ursache dafür, dass es in der Folge der geschilderten logistischen Neuorientierung zu starken Ladungsanteilsverlusten bei Eisenbahn und Binnenschiff kam. Neben dem Güterstruktur- und dem Logistikeffekt sind noch der Integrationseffekt²⁵ und der Schnittstelleneffekt zu berücksichtigen.²⁶ Als **Integrationseffekt** wird das wirtschaftliche Zusammenwachsen verbunden mit der Zunahme grenzüberschreitender Transportströme bezeichnet. Der Integrationseffekt umschreibt dementsprechend die Wirkungen der räumlichen Ausdehnung von Integrationsräumen. Diese räumliche Erweiterung bringt zunächst entfernungspezifische Vorteile für den Schienenverkehr. Jedoch werden generell die Eisenbahnprobleme im grenzüberschreitenden Verkehr aktualisiert, insbesondere im Leistungsaustausch mit den mittel- und osteuropäischen Staaten, in denen der Schienengüterverkehr aufgrund organisatorischer und speziell auch infrastruktureller Mängel erhebliche Qualitätsdefizite aufweist.²⁷ Infolgedessen kann der Straßengüterverkehr Marktvorteile realisieren. Beim **Schnittstelleneffekt** ist zu beachten, dass viele Transportaufgaben aus mehreren Prozessen bestehen, d. h. es liegen mehrgliedrige Transportketten vor, die i. d. R. Zu- und Ausläufe aufweisen.²⁸ Gerade für Zu- und Ausläufe wer-

²³ Vgl. Bloech, J./ Ihde, G. (1997), S. 577.

²⁴ Vgl. Tan, K. (2001), S. 39.

²⁵ Vgl. Bloech, J./ Ihde, G. (1997), S. 1022.

²⁶ Der Vollständigkeit wegen sei noch der Begriff "**Infrastruktureffekt**" erwähnt. Unter ihm werden verkehrspolitische Aspekte zusammengefasst, die bei der Anteilsverschiebung innerhalb der binnenländischen Verkehrsteilung eine Rolle spielen. Derartige verkehrspolitische Aspekte sind z. B., dass durch den verstärkten Ausbau der Verkehrswege eines bzw. durch die vernachlässigte Infrastrukturerhaltung eines anderen Verkehrsträgers deren Entwicklung gefördert bzw. gehemmt wird. Vgl. Läßle, D. (1995), S. 290. Eine Auswertung der verkehrspolitischen Aktivitäten in den letzten Jahren und deren Auswirkung auf die binnenländische Verkehrsteilung soll an dieser Stelle nicht erfolgen.

²⁷ Vgl. Aberle, G. (2005), S. 4 f.

²⁸ Vgl. Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001) S. 269.

den aufgrund der Systemvorteile des Straßengüterverkehrs fast ausnahmslos LKWs eingesetzt.

Dass eine Anteilsverschiebung zugunsten des Straßengüterverkehrs aufgrund des Güterstruktur-, des Logistik-, des Integrations- und des Schnittstelleneffektes stattfindet, hängt stark mit dessen Systemeigenschaften zusammen. Als signifikante Eigenschaften, die dem Straßengüterverkehr entscheidende **Systemvorteile** gegenüber alternativen Verkehrsträgern verschaffen, gelten:²⁹

- stetige Einsatzbereitschaft (keine festen Fahrpläne)
- hohe Flexibilität und Individualität
- Schnelligkeit im Kurz- und Mittelstreckenbereich
- hohe Anpassungsfähigkeit an spezifische und wechselnde Bedarfe insbesondere durch vielfältige Fahrzeugtypen und Spezialaufbauten
- höchster Flächenerschließungsgrad; Fähigkeit flächendeckend, ohne aufwendige Umladevorgänge, "Haus-zu-Haus"-Verkehre durchzuführen
- relativ autonome Organisation der Beförderung im Hinblick auf andere Straßenverkehrsnutzer
- verhältnismäßig niedrige Stillstands- und Wartezeiten
- vergleichsweise flexible Ladungseinheiten von unter 1 t bis etwa 27 t

Aufgrund der genannten Vorteile weist der Straßengüterverkehr im allgemeinen eine hohe Wirtschaftlichkeit und eine hohe Flexibilität beim Fahrzeugeinsatz auf. Resultierend aus den Vorteilen ergeben sich folgende **Haupteinsatzfelder** des Straßengüterverkehrs, die die Eignung des Straßengüterverkehrs für sehr unterschiedliche logistische Leistungsanforderungen repräsentieren:³⁰

- Transport zeitempfindlicher Güter
- Transport von kleinen Transportmengen bzw. Sendungsgrößen
- Durchführung von Direkttransporten über kurze und mittlere Entfernungen
- Ausführung von Transporten mit besonderen Anforderungen an die Transportmittel
- Durchführung von Sammel- und Verteiltransporten
- Organisation von Vor- und Nachlauftransporten zu den übrigen Verkehrsträgern

²⁹ Vgl. Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001) S. 269, Ehrmann, H. (2003), S. 192 und Schulte, C. (1999), S. 142. Nachteilig wirken sich auf den Straßengüterverkehr Verkehrstörungen, Witterungseinflüsse, Einschränkungen bei Gefahrgütern, ein eingeschränktes Transportvolumen und rechtliche Einschränkungen aus.

³⁰ Vgl. Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001) S. 269.

- Ausführung von Transporten in durch andere Verkehrsmittel nicht erschlossene Gebiete
- Transporte über mittlere und große Entfernungen bei leichtverderblichen und hochwertigen Gütern, sofern eine Erfüllung der Transportanforderungen anders nicht erfolgt

Die genannten Vorteile und Haupteinsatzfelder zeigen, dass der Straßengüterverkehr für die Umsetzung einer dynamischen Tourenplanung besonders gut geeignet ist, da er schnell und flexibel auf die Anforderungen dynamischer Kunden reagieren kann. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die dynamische Tourenplanung ausführlich in Bezug auf den Straßengüterverkehr betrachtet.

2.2 Einordnung der Tourenplanung in die betriebswirtschaftliche Logistik

Der ursprünglich aus dem militärischen Bereich stammende Begriff "Logistik" wird heute im betriebswirtschaftlichen Bereich in erster Linie auf Güter und Informationen bezogen.³¹ **Logistik** ist die ganzheitliche, marktgerechte Planung, Steuerung, Abwicklung und Kontrolle sämtlicher Material-, Waren- und Informationsflüsse vom Lieferanten in das Unternehmen, innerhalb des Unternehmens sowie vom Unternehmen zum Kunden.³² Die Logistik gliedert sich in einem Industrieunternehmen phasenspezifisch in Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik, die der Versorgungslogistik zugeordnet werden, sowie in Entsorgungslogistik, die der Versorgungslogistik entgegen gerichtet ist. Versorgungs- und Entsorgungslogistik bilden den logistischen Kreislauf, wie in Abbildung 2-3 dargestellt.

Die **Distributionslogistik** ist das Bindeglied zwischen dem Produktionsprozess, welchen die Produktionslogistik begleitet, und dem Absatzmarkt.³³ Sie befasst sich mit allen Tätigkeiten, die im Zusammenhang mit dem Warenfluss vom Fertigproduktelager respektive der Produktion zum Absatzmarkt sowie des dazugehörigen Informationsflusses stehen. Solche Tätigkeiten sind z. B. alle Lager-, Umschlags- und Transportvorgänge im Bereich der Distribution sowie die damit in Zusammenhang stehenden Informations-, Steuerungs- und Kontrolltätigkeiten.

³¹ Vgl. zur Geschichte der Logistik z. B. Isermann, H. (1998), S. 21, Pfohl, H.-C. (2004a), S. 3 f. und Rushton, A. et al. (2000), S. 7 ff.

³² Vgl. Uhr, W./ Lasch, R. (2003), S. A.1.2. und Schulte, C. (1999), S. 1. Eine ausführliche Darstellung zu Definitionsansätzen der Logistik befindet sich in Lasch, R. (1998), S. 5 ff.

³³ Vgl. Lasch, R. (1998), S. 22. und Vastag, A./ Schürholz, A. (2002), S. B 5-1.

Idealerweise sollten alle Teilprobleme des logistischen Kreislaufes, wie z. B. die Planung der Bestell-, Produktions-, Transport-, Lager- und Entsorgungsmengen simultan gelöst werden. Aufgrund des damit verbundenen immensen Aufwandes, der Unsicherheit der zugrundeliegenden Daten, der unterschiedlichen Geltungslänge verschiedener Teilplanungen und organisatorischer Aspekte, ist eine simultane Planung i. d. R. nicht möglich.³⁴ Die Planung erfolgt daher oft für die Teilbereiche Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik getrennt und kann auch innerhalb der Teilbereiche nochmals nach Aufgabengebieten untergliedert sein.

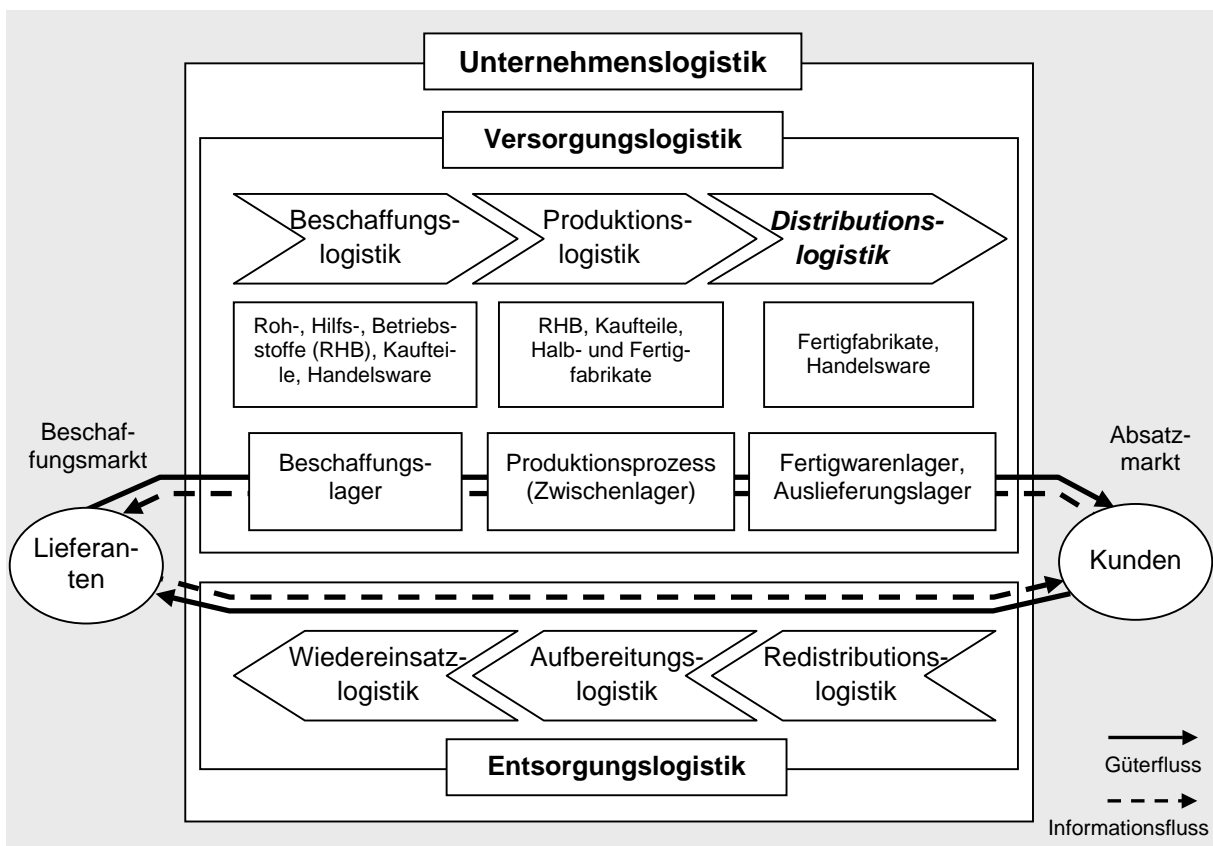


Abb. 2-3: Subsysteme der Unternehmenslogistik

Quelle: In Anlehnung an Wildemann, H. (1997), S. 53 und Pfohl, H.-C. (2004b), S. 18.

Die Aufgaben der Distributionslogistik können in strategische und operative unterteilt werden:³⁵

- strategisch:
- Gestaltung der Distributionsstruktur
 - Bestimmung der Lagerstandorte
 - Planung und Gestaltung der Lagerhäuser
 - Festlegung der Vertriebsstrukturen und der Transportwege

³⁴ Vgl. Wöhe, G. (1996), S. 155.

³⁵ Vgl. Uhr, W./ Lasch, R. (2003), S. B3.1.3., Ehrmann, H. (2003), S. 427, Erkens, E. (1998), S. 20 f. und Hirsch, T. (1998), S. 22.

- Make-or-buy-Analysen (z. B. Entscheidung über Eigentransport/ Fremtransport)
 - Bestimmung von Mindestauftragsgrößen
- operativ:
- Lagerhaltung
 - Kommissionierung und Verpackung
 - Auftragsabwicklung
 - Warentransport einschließlich **Tourenplanung**
 - Ersatzteillogistik (soweit nicht der strategischen Ebene zuordenbar)

Die Einteilung in strategisch und operativ resultiert aus der unterschiedlichen Bedeutung der Planungsaufgabe und aus der Länge des der jeweiligen Planungsaufgabe zugrundeliegenden Planungszeitraumes. Eine strategische Planung betrachtet die allgemeinen Unternehmensziele und die dabei zu verfolgenden Strategien, da sie Vorstellungen über die zukünftige Entwicklung des Unternehmens enthält.³⁶ Die strategische Planung hat infolgedessen langfristigen Charakter und der Schwerpunkt liegt auf der obersten Führungsebene. Die Datenunsicherheit ist relativ groß, die Problemstellungen sind meist unstrukturiert und komplex und die Detailliertheit ist eher gering. Im Gegensatz dazu weist eine operative Planung einen sehr kurzfristigen Zeithorizont mit hohem Detaillierungsgrad auf. Meist steht ein einzelner Teilbereich im Vordergrund, für den relativ verlässliche Daten vorliegen, und das betrachtete Problem kann gut strukturiert werden. Die Tourenplanung ist demnach eine Teilaufgabe der operativen Distributionslogistik.

Im Sinne der Logistikdefinition hat die Tourenplanung dafür Sorge zu tragen, dass die Bedienung eines Kunden (z. B. Empfangs- oder Abholpunkt) gemäß seines Bedarfs bzw. Bedürfnisses, mit dem richtigen Produkt oder der richtigen Dienstleistung, im richtigen Zustand (Qualität), zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, zu den dafür minimalen Kosten erfolgt.³⁷

Oftmals, vor allem im Bereich der Konsumgüterindustrie, sind distributionslogistische Problemstellungen dadurch gekennzeichnet, dass einem Anbieter (Produzent, Händler) mehrere Kunden (Groß- und Einzelhändler oder private Kunden) gegenüberstehen, zu denen zumeist kleine Liefermengen transportiert werden, die die Fahrzeugkapazität nicht ausschöpfen. Aber auch im Dienstleistungssektor, wie bei Speditionen oder Kurier-, Express- und Paketdienstleistern (KEP), werden i. d. R. Sendungen verschiedenster Kunden auf einem Fahrzeug gemeinsam befördert. Eine Zusammenfassung von Kunden zu Touren, d. h. ein Fahr-

³⁶ Vgl. Thommen, J.-P./ Achleitner, A.-K. (2003), S. 771.

³⁷ In Anlehnung an die "sechs r's" von Jünemann, R. (1989), S. 18 und Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001) S. 19.

zeug bedient jeweils mehrere Kunden, ist unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ratsam.

Im Rahmen dieser Arbeit findet die Betrachtung der täglichen bzw. sogar mehrmals täglichen Zusammenstellung der Touren statt, da das Hauptaugenmerk auf der dynamischen Tourenplanung liegt. Die dynamische Tourenplanung ist deshalb gleichfalls den operativen Aufgaben der Distributionslogistik zuzuordnen und weist sogar einen noch kurzfristigeren Charakter als die klassische Tourenplanung auf. Aufgrund des dynamischen Dateninputs bei der dynamischen Tourenplanung müssen mehrmals täglich, oft stündlich, Planungsergebnisse modifiziert, d. h. ein neuer Tourenplan generiert werden.

Die mittelfristige oder langfristige Planung von Touren, sogenannte Standard- oder Rahmentouren,³⁸ wie sie beispielsweise bei der Müllabfuhr und bei Schulbusverkehren verwendet werden, zählen zu den taktischen und strategischen Planungsaufgaben und bilden die Ausnahme in der Transportbranche. Standard- bzw. Rahmentouren kommen zum Einsatz, wenn das Auftragsprogramm nur geringen Schwankungen unterliegt oder gleichbleibende Touren gewünscht sind. In dieser Arbeit werden Standard- bzw. Rahmentourkonzepte, hier als a priori Methoden bezeichnet, vorgestellt, mit denen Abschätzungen der erwarteten benötigten Fuhrparkgröße oder der erwarteten Tourlängen im Vorhinein möglich sind (vgl. Kapitel 3.4). Dazu erfolgt bei diesen Methoden die Einbeziehung von Auftrittswahrscheinlichkeiten bezüglich der Kunden.

Zwischen den verschiedenen Planungsbereichen (Standort-, Lager-, Transport- und Tourenplanung) der Distributionslogistik liegen wechselseitige Interdependenzen vor.³⁹ Beispielsweise beeinflusst die Ausgestaltung der vertikalen (Anzahl der Distributionsstufen (Lagerebenen)) und horizontalen Struktur (Anzahl Lager auf einer Stufe) die Anzahl und die Länge der Transportwege, die Kosten der Auslieferung und den erreichbaren Lieferservice. Des Weiteren bestimmt die Anzahl der Auslieferungslager die Größe der Liefergebiete und somit die durchschnittliche Länge der Touren. Gleiches gilt für die Standortplanung von "Hubs" bei Hub-and-spoke-Systemen⁴⁰ im Speditions- und KEP-Bereich. An den Hubs werden entweder Zuläufe zu Hauptläufen gebündelt oder Hauptläufe in Ausläufe aufgespaltet. Je höher die Anzahl der Hubs, desto geringer ist die Größe des durch den jeweiligen Hub bedienten Einzugsgebietes. Daraus folgt, dass die dem Hub zugeordneten Touren eine im Durchschnitt geringere Länge bei großer Hubanzahl aufweisen. Die zwingende Beachtung der vorliegen-

³⁸ Vgl. Fleischmann, B. (1998), S. 288 und Schmidhöfer, A. (2004), S. 24 ff.

³⁹ Vgl. Hirsch, T. (1998), S. 2, Vogt, M. (1998), S. 19 und Wildemann, H. (1997), S. 202.

⁴⁰ Vgl. Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001) S. 47.

den wechselseitigen Interdependenzen wird im Rahmen dieser Arbeit als berücksichtigt angenommen.⁴¹ Wie bereits erwähnt, befassen sich die hier vorgestellten Konzepte und Verfahren nur mit der täglichen Planung von Touren zum Einsammeln oder Ausliefern von Gütern.

2.3 Problemstellung der Tourenplanung und Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen

Vor über 40 Jahren führten DANTZIG und RAMSER 1959 das Tourenplanungsproblem (Vehicle Routing Problem (VRP)) ein.⁴² Sie beschrieben die Belieferung von Tankstellen mit Kraftstoff und entwickelten ein erstes Modell sowie einen Lösungsalgorithmus zur Tourenplanung. Ein paar Jahre später, 1964, veröffentlichten CLARKE und WRIGHT ein einfaches effektives Verfahren (heute als Savings-Verfahren bekannt),⁴³ das den Algorithmus von DANTZIG und RAMSER verbesserte. In der folgenden Zeit wurde bis heute eine Vielzahl von Modellen und Algorithmen für die optimale und die heuristische Lösung von verschiedenen Varianten des Tourenplanungsproblems entwickelt. Das große Interesse an diesem kombinatorischen Optimierungsproblem kann vor allem auf die praktische Relevanz und die Schwierigkeit, das Problem exakt zu lösen bzw. gute Näherungslösungen zu finden, zurückgeführt werden. Die größten Probleme, die bis jetzt exakt gelöst wurden, umfassen ca. 50 Knoten.⁴⁴ Eng verbunden mit der Entwicklung von Modellen und Verfahren ist deren Umsetzung in Softwareprogrammen. Untersuchungen im Zusammenhang mit der Vielzahl von Softwareanwendungen auf praktische Problemstellungen in Europa und Nordamerika haben gezeigt, dass Einsparungen von 5 % bis 20 % bei den Transportkosten erreicht werden können.⁴⁵

Allgemein ist ein Tourenplanungsproblem, welches auch als **Standardproblem der Tourenplanung** (Vehicle Routing Problem (VRP)) bezeichnet wird, dadurch gekennzeichnet, dass ein Tourenplan, der aus mehreren Touren (Vehicle Routes) besteht, zur Bedienung einer bestimmten Anzahl von Kunden generiert wird.⁴⁶ Dabei weist eine Tour die Charakteristik auf, dass sie an einem Depot beginnt, die gegebenen Kunden in einer bestimmten

⁴¹ Beispielsweise befasst sich HIRSCH mit den Schnittstellen zwischen strategischer und operativen Planungsebene und ENGELE analysiert die simultane Standort- und Tourenplanung. Vgl. Hirsch, T. (1998), S. 7 ff. und Engele, G. (1981), S. 13 ff.

⁴² Vgl. Dantzig, G./ Ramser, J. (1959), S. 80 ff.

⁴³ Vgl. Clark, G./ Wright, J.W. (1964), S. 568 ff.

⁴⁴ Vgl. Homberger, J. (2000), S. 62 ff.

⁴⁵ Vgl. Toth, P./ Vigo, D. (2002), S. 1.

⁴⁶ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-53, Diruf, G. (1999), S. 383 f., Domschke, W. (1997), S. 211 und Fleischmann, B. (1998), S. 287 f.

Reihenfolge besucht und wieder am Depot endet. Alle Kunden sind genau einmal zu besuchen, die Nachfrage aller Kunden muss befriedigt werden und die gesamte Kundennachfrage einer Tour darf die Kapazität des Fahrzeuges nicht überschreiten.⁴⁷ Die Bedarfe und Standorte der Kunden sowie die Entfernungen zwischen den Kunden und zwischen dem Depot und den Kunden sind bekannt. Die zu bestimmenden Touren können sowohl Einsammel- als auch Auslieferungstouren sein, wobei das Ziel verfolgt wird, die insgesamt zurückzulegende Entfernung zu minimieren.

Bei der Tourenplanung sind zwei Teilprobleme zu lösen. Das eine ist das Zuordnungs- bzw. Gruppierungsproblem und das andere das Routing- bzw. Reihenfolgeproblem.⁴⁸ Bei ersterem wird jeder Kunde genau einer Tour zugeordnet, d. h. es findet eine Aufteilung der Menge der Kunden in disjunkte Teilmengen (Cluster) statt. Die Bestimmung der Bedienungsreihenfolge der Kunden innerhalb einer Tour ist Gegenstand des letzteren Problems.

Eine der grundlegendsten Unterscheidungen bei Tourenplanungsproblemen ist die Differenzierung in knotenorientierte und kantenorientierte Problemstellungen, die sich in Abhängigkeit von der Charakteristik des Kunden ergibt. Bei knotenorientierten Problemen stellen die Kunden diskrete Punkte in einer Ebene dar, während bei kantenorientierten Problemen die Kunden gleichmäßig über die zu ver- oder entsorgenden Straßen verteilt sind (Müllabholung oder Verteilung von Post) bzw. die Straße selbst der Kunde ist.⁴⁹ Ein Baustoffhändler, der mit seinem Fuhrpark mehrere Baustellen von einem Lager aus mit Zement beliefert, wobei der kumulierte Bedarf über alle Baustellen die Kapazität eines Fahrzeuges überschreitet, stellt ein knotenorientiertes Tourenplanungsproblem dar. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei einer Straßenmeisterei, die im Winter bei Schneefall Straßen in einer vorgegebenen Zeit zu räumen und zu streuen hat, um ein kantenorientiertes Tourenplanungsproblem. In beiden Fällen ist das Problem zu lösen, welche Kunden sollen welchem Fahrzeug zugeordnet und in welcher Reihenfolge sollen die Kunden in der jeweiligen Tour bedient werden. Beim ersten Beispiel dürfen die Bedarfe der Baustellen je Tour die Fahrzeugkapazität nicht überschreiten und beim zweiten Beispiel darf zum einen die kumulierte Streumenge für die Straßen einer Tour und zum anderen die benötigte kumulierte Zeit zum Bedienen der Straßen einer Tour die gegebene Restriktion nicht überschreiten. Bei knotenorientierten Tourenplanungsproblemen wird auch von verallgemeinerten Traveling Salesman Problemen und bei kantenorientierten Tourenplanungsproblemen von verallgemeinerten Chinese Postman Problemen

⁴⁷ In Abhängigkeit von der betrachteten Quelle wird die Beschränkung der maximalen Tourdauer mit zum Standardproblem hinzugezählt oder nicht.

⁴⁸ Vgl. Gietz, M. (1994), S. 23 und Domschke, W. (1997), S. 234.

⁴⁹ Vgl. Vogt, M. (1998), S. 20.

gesprochen.⁵⁰ Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt nur die Betrachtung der knotenorientierten Tourenplanung.⁵¹

Für Tourenplanungsprobleme gibt es eine Vielzahl von Erweiterungen bzw. Spezialfällen anhand derer sie sich unterscheiden können. Beispiele verschiedener Anwendungsbereiche sind Einsammelprobleme, Auslieferungsprobleme, Pick-up and Delivery - Probleme, Transport von Personen, Dial-a-Ride-Problemstellungen, Tourenplanungsprobleme mit heterogenem Fuhrpark, Mehr-Depot-Tourenplanung, Tourenplanung mit Kundenzeitfenstern (Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)), das Tourenplanungsproblem mit tageszeitabhängigen Fahrzeiten (Time-Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP)), dynamische Tourenplanung (Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)) usw.⁵²

Ein weiterer Spezialfall der Tourenplanung ist das Traveling Salesman Problem (TSP), auch als Rundreiseproblem bezeichnet. Beim Traveling Salesman Problem sind keine Fahrzeugkapazitäten und Kundenbedarfe zu beachten. Damit ergibt sich als Ergebnis nur eine Tour - die Rundreise. Sonst gilt ebenfalls, dass jeder Kunde genau einmal zu besuchen ist und die Rundreise bzw. die Tour am Depot beginnt und endet.

Das Standardproblem, wie zuvor erläutert, beachtet nur die begrenzte Ladekapazität der Fahrzeuge als praxisrelevante Nebenbedingung. Tourenplanungsprobleme in der Praxis sind aber meist wesentlich komplizierter. Je mehr Restriktionen berücksichtigt werden, desto praxistauglicher sind die Modelle und Verfahren, wobei mit steigender Anzahl an Nebenbedingungen die Komplexität der Planung zunimmt. In dem folgenden Merkmalskatalog sind die wichtigsten Kriterien zur Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen aufgeführt:

Aufträge	
Art	<ul style="list-style-type: none"> - nur Einsammeln - nur Ausliefern - sowohl Einsammeln als auch Ausliefern innerhalb einer Tour - kombinierte Einsammel-Auslieferungs-Aufträge (Pick-up and Delivery)
Standort	<ul style="list-style-type: none"> - auf Knoten - auf Kanten/ Pfeilen - gemischt
Daten	<ul style="list-style-type: none"> - deterministisch - statisch - stochastisch - dynamisch

⁵⁰ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 205.

⁵¹ Vgl. zum Chinese Postman Problem bspw. Dror, M. (2000), S. 2 ff. und Eiselt, H. et al. (1995), S. 231 ff.

⁵² Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-53 ff., Diruf, G. (1999), S. 384 f., Fleischmann, B. (1998), S. 289 und Vogt, M. (1998), S. 19.

Aufträge (Fortsetzung)	
zeitliche Einschränkung	<ul style="list-style-type: none"> - freie Belieferungszeit - einseitiges Belieferungsintervall - zweiseitiges Belieferungsintervall - fixe Belieferungszeit - weiche Zeitfenster - mehrere Zeitfenster
Teilbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> - nicht teilbare Lieferung - beliebig teilbare Lieferung - beschränkt teilbare Lieferung (z. B. Mindestmengen)
Auftragsgröße	<ul style="list-style-type: none"> - Komplettladung - Teilladung
Transportobjekt	<ul style="list-style-type: none"> - Güter - Personen
Reihenfolge der Aufträge	<ul style="list-style-type: none"> - beliebig - Vorgänger-/Nachfolger-Beziehungen
Auswahl der Aufträge	<ul style="list-style-type: none"> - Durchführung aller Aufträge - Auswahl der zu befördernden Aufträge
Häufigkeit der Aufträge	<ul style="list-style-type: none"> - einmalig - teilperiodisch - periodisch
Fuhrpark	
Größe	<ul style="list-style-type: none"> - ein Fahrzeug - mehrere Fahrzeuge in begrenzter Anzahl - unbegrenzte Fahrzeuganzahl
Zusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"> - homogen (nur ein Fahrzeugtyp) - heterogen (verschiedene Fahrzeugtypen)
Standort	<ul style="list-style-type: none"> - ein Depot - mehrere Depots - nicht depotbezogen
Einsatzhäufigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Einfacheinsatz - Mehrfacheinsatz
Zeitrestriktion	<ul style="list-style-type: none"> - keine Beschränkung - maximale Tourdauer
Zugrundeliegendes Netzwerk	
Daten	<ul style="list-style-type: none"> - symmetrisch (ungerichteter Graph) - asymmetrisch (gerichteter Graph) - gemischt
Art des Netzwerkes	<ul style="list-style-type: none"> - Straßennetz (reale Entfernungen) - Koordinatennetz (euklidische Distanzen)
Fahrzeiten	<ul style="list-style-type: none"> - konstant - tageszeitabhängig - dynamisch
Planungshorizont	
Länge	<ul style="list-style-type: none"> - eine Periode - mehrere Perioden - unendlich
Art	<ul style="list-style-type: none"> - einmalig - rollierend

Touren	
Typ	<ul style="list-style-type: none"> - täglich verschiedene Touren - Standardtours
Art	<ul style="list-style-type: none"> - offene Touren ohne Rückkehr zum Depot - geschlossene Touren
Beschränkungen	<ul style="list-style-type: none"> - minimale/maximale Tourdauer - minimale/maximale Tourlänge - minimale/maximale Auftragsanzahl je Tour - Restriktionen bezüglich des Fahrpersonals (maximale Einsatzzeit, Lenkpausen usw.)
Zielsetzung	
	<ul style="list-style-type: none"> - Minimierung der gesamten Tourlänge - Minimierung der gesamten Tourdauer - Minimierung der Anzahl benötigter Fahrzeuge - Minimierung der gesamten Tourkosten

Tab. 2-3: Merkmale von Tourenplanungsproblemen

Quelle: Vgl. Assad, A. A. (1988), S. 12, Bodin, L./ Golden, B. (1981), S. 98 f., Schulte, C. (1999), S. 169, Stumpf, P. (1998), S. 81 ff. und Vogt, M. (1998), S. 28.

Auf eine detaillierte Beschreibung aller Aspekte der Tabelle wird an dieser Stelle verzichtet, da alle Begriffe selbsterklärend sind, lediglich einige besondere Aspekte der gegebenen Übersicht sollen erörtert werden.⁵³ Wie die Tabelle schon zeigt, ergeben sich sehr viele unterschiedliche Tourenplanungsprobleme alleine aus der Charakteristik der Kunden respektive der Kundenaufträge.⁵⁴ So ist prinzipiell eine Unterscheidung nach Einsammel- oder Auslieferungstouren möglich bzw. es besteht auch die Möglichkeit, beides in einer Tour zu verbinden, wobei dann eine Unterscheidung stattfindet, ob es sich um Aufträge handelt, bei denen die selbe Ware innerhalb einer Tour aufzunehmen und abzugeben ist (Pick up and Delivery - Probleme)⁵⁵ oder ob die einzusammelnde Ware Rückladungen (Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB))⁵⁶ darstellt, die am Depot abzugeben sind. Probleme mit Rückladungen treten bspw. bei der Retourenplanung bzw. Rücknahme von Mehrwegverpackungen auf. Pick up and Delivery - Probleme liegen hauptsächlich vor, wenn die Transportobjekte Personen sind, jedoch kaum bei Gütertransporten.

⁵³ Bei VOGT befindet sich eine umfassende Darstellung zu weiteren Kunden-, Auftrags-, Fuhrpark-, Touren-, Personal-, Depot- und Umweltrestriktionen. Vgl. Vogt, M. (1998), S. 29 ff.

⁵⁴ Eine der hier nicht weiter ausgeführten Kundenauftragseigenschaften ist die Häufigkeit der Aufträge. KABATH befasst sich beispielsweise detailliert mit der periodischen Tourenplanung. Vgl. Kabath, M. (1997), S. 57 ff.

⁵⁵ DETHLOFF setzt sich insbesondere mit der Tourenplanung von Pick up and Delivery - Problemen unter Berücksichtigung von Kundenzeitfenstern auseinander. Vgl. Dethloff, J. (1994), S. 10 ff. Vgl. auch Dumas, Y. et al. (1991), S. 7 ff. und Toth, P./ Vigo, D. (2002), S. 10 f. Speziell das Pick up and Delivery - Problem bei Just-in-time-Belieferungen behandelt URBAN. Vgl. Urban, K.-P. (2004), S. 23 ff.

⁵⁶ Vgl. Toth, P./ Vigo, D. (2002), S. 9 f.

Sehr entscheidend für die hier vorliegende Arbeit sind die Eigenschaften der Inputdaten der Tourenplanung. Wie später ausführlich in Kapitel drei erklärt wird, kann eine Unterscheidung erfolgen, ob die Daten deterministisch, statisch, stochastisch und/oder dynamisch sind. Dabei schließt eine Kategorie die andere nicht notwendigerweise aus.⁵⁷ Deterministisch bedeutet, alle Daten sind mit Sicherheit vollständig bekannt. Ein stochastisches Problem liegt vor, wenn Daten zufällig bekannt werden, d. h. zum Planungszeitpunkt unbekannt oder mit Unsicherheit behaftet sind. Bei einem statischen Problem variieren die Daten nicht, während sich bei einem dynamischen Problem die Ausprägungen bestimmter Variablen ändern. In dieser Arbeit werden schwerpunktmäßig dynamische Aspekte der Tourenplanung betrachtet.

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Definition der dynamischen Tourenplanung,⁵⁸ da sie für später folgende Erläuterungen in diesem Kapitel Grundlage ist:

Dynamische Tourenplanung

- Nicht alle Informationen sind vor dem Planungsprozess bekannt.
- Die Informationen können sich ändern (z. B. neue Kunden kommen hinzu) nachdem die Touren geplant wurden, d. h. parallel zur Ausführung der Touren.
- Es findet daher eine mehrmalige Aktualisierung der Planungsergebnisse vorheriger Planungsschritte statt.

Eine ausführliche Definition und weitere Erläuterungen zur dynamischen Tourenplanung sind Gegenstand von Kapitel drei.

Eine sehr wichtige Erweiterung des Standardproblems ist die Berücksichtigung von zeitlichen Beschränkungen (Kundenzeitfenstern) bei der Ausführung der Kundenaufträge.⁵⁹ Die Bedienung der Kunden i muss dabei in einem vorgegebenen Zeitintervall $[e_i, l_i]$ (mit e_i früheste Ankunftszeit und l_i späteste Ankunftszeit beim Kunden i) erfolgen, wobei Problemstellungen dahingehend unterschieden werden, ob es sich um ein Zeitintervall mit festen Grenzen handelt, deren Verletzung durch das benutzte Lösungsverfahren vermieden wird, oder um eines mit weichen Grenzen, deren Überschreitung zwar möglich ist, jedoch mit Strafkosten belegt wird. Ferner erfolgt eine Differenzierung danach, ob pro Kunde ein Zeitfenster gegeben ist, mehrere Zeitfenster vorliegen oder ein konkreter Zeitpunkt, wenn untere und obere Zeitfensterschranke zusammenfallen, zu beachten ist. Kundenzeitfenster treten beispielsweise zum einen auf, wenn der Kunde diese selber vorgibt, sowie liegen zum anderen vor, wenn die

⁵⁷ Vgl. Ghiani, G. et al. (2003), S. 3.

⁵⁸ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 4 f. und Psaraftis, H. (1988), S. 224 f.

⁵⁹ Vgl. Desrosiers, J. et al. (1995), S. 35 ff., Solomon, M./ Desrosiers, J. (1988), S. 1 ff. sowie Weissermel, M. (1999), S. 9.

persönliche Annahme durch den Kunden erforderlich ist und die Zeitfenster sich an den Geschäftszeiten orientieren oder Halte- und Durchfahrverbote in Innenstadtbereichen bzw. Einkaufszonen zu beachten sind.

Der zugrundeliegende Fuhrpark mit den Eigenschaften wie Kapazität, Ausstattung und Verfügbarkeit, anhand dessen sich entscheidet, ob es sich um ein Tourenplanungsproblem mit homogenem oder heterogenem Fuhrpark handelt, stellt eine signifikante Determinante dar.⁶⁰ Zum einen muss eine Fuhrparkoptimierung nach Größe, Zusammensetzung usw. in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden, zum anderen bestimmt die Charakteristik der im Fuhrpark enthaltenen Fahrzeuge, welche Aufträge überhaupt ausgeführt werden können. Für die Planung bedeutet ein heterogener Fuhrpark, welcher in der Praxis meist vorliegt, eine höhere Komplexität als ein homogener Fuhrpark.

Fahrzeuge können bei kurzer Tourdauer (z. B. bei innerstädtischen Touren) auch mehrfach eingesetzt werden.⁶¹ In diesem Fall erfolgt die Neubeladung des Fahrzeuges am Depot nach Beendigung einer abgeschlossenen Tour und danach beginnt die Ausführung einer Folgetour. Diese Aufgabenstellung wird auch als Tourenplanungsproblem mit Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen bezeichnet. Voraussetzung für diese Problemstellung sind kurze Fahrzeiten zwischen den Kunden, geringe Standzeiten bei den Kunden und wenige Kunden je Tour.

Ein weiterer Spezialfall sind Mehrdepot-Auslieferungsprobleme, bei denen es möglich ist, dass die Touren an verschiedenen Depots, in denen die Fahrzeuge stationiert sind, beginnen und enden.⁶² Für jede Tour erfolgt somit zusätzlich die Festlegung, von welchem Depot aus sie startet.

Bei der Tourenplanung mit tageszeitabhängigen Fahrzeiten wird die Annahme, dass konstante Fahrzeiten vorliegen, zugunsten der in der Praxis auftretenden, im Tagesablauf schwankenden Fahrzeiten (z. B. Staus und langsam fließender Verkehr im Berufsverkehr aufgrund hohem Verkehrsaufkommens) verworfen.⁶³ Diese Problemstellung tritt vorwiegend in Stadt- oder Ballungsgebieten auf. Die Optimierung erfolgt hier nach den Fahrzeiten und nicht nach den kürzesten Entfernungen.

Abschließend seien noch die Differenzierung in Ein- oder Mehrperiodenprobleme sowie Tourenplanungsprobleme mit und ohne Zulässigkeit von Teilbelieferungen erwähnt. So

⁶⁰ Vgl. Fisher, M. (1995), S. 2.

⁶¹ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-54 und Diruf, G. (1999), S. 385.

⁶² Vgl. Schmalz, A. (2002), S. 32 ff., Vahrenkamp, R. (2003), S. 234 und Weuthen, H.-K. (1983), S. 14 ff.

⁶³ Vgl. Ichoua, S. et al. (2003), S. 379 und Ahn, B.-H./ Shin, J.-Y. (1991), S. 393 und Gietz, M. (1994), S. 149.

erfolgt bei den zuerst genannten Problemen eine Unterscheidung, ob die Planung sich nur auf eine Periode bezieht, z. B. einen Arbeitstag, oder ob eine Planung für mehrere Perioden stattfindet, z. B. Übernachtfahrten und Mehrtagestouren vor allem im Bereich des Fernverkehrs. Bei den zuletzt genannten Teilbelieferungen wird die Teilbarkeit von Aufträgen im Verhältnis zur maximalen Kapazität der Fahrzeuge untersucht. So kann es bei großen Aufträgen zwangsläufig notwendig sein, dass der Kunde aufgrund geringer Fahrzeugkapazitäten durch mehrere Fahrzeuge Teillieferungen erhält. Die Nichtverträglichkeit verschiedener Produkte wie Lebensmittel und andere Gebrauchsgüter führt ebenfalls zur Notwendigkeit von Teillieferungen. Je nachdem ob derartige praktische Restriktionen von Modellen und Verfahren beachtet werden können, erhalten die Tourenplanungsprobleme einen entsprechenden Zusatztitel.⁶⁴ Bei der softwaretechnischen Implementierung, die Gegenstand des Kapitels 2.6 ist, sollte es das Ziel sein, möglichst viele der in Tabelle 2-3 genannten Aspekte zu berücksichtigen, um eine Akzeptanz und Anwendbarkeit der Software in der Praxis zu gewährleisten.

2.4 Zielstellungen der Tourenplanung

Zielsetzungen bei der Bestimmung von Tourenplänen lassen sich aus dem erwerbswirtschaftlichen Prinzip⁶⁵ ableiten, aus dem beispielsweise wiederum die Gewinnmaximierung als Zielstellung unternehmerischen Handels resultiert. Bei der daraus folgenden Bestimmung einer konkreten Zielfunktion für die Tourenplanung wird in der Literatur folgende Annahme getätigt: Die Frage, ob die Bedienung einzelner Kunden überhaupt erfolgt oder nicht, ist selbst nicht mehr Gegenstand der operativen Tourenplanung. Das bedeutet, dass die Erlöse zumindest nicht direkt von der Tourenplanung beeinflusst werden.⁶⁶ Infolgedessen findet die in diesem Fall äquivalente Zielstellung Kostenminimierung anstelle der Gewinnmaximierung Anwendung.

Dem in dieser Arbeit zur dynamischen Tourenplanung vorgestellten, durch den Autor neu entwickelten Verfahren liegt die gleiche Annahme zu Grunde, d. h. es steht fest, dass ein dynamischer Kunde zu bedienen ist. Lediglich die Integration in den bestehenden Tourenplan soll verfahrensgestützt kostenminimal erfolgen. Natürlich wäre aber auch die Abweisung von dynamischen Kunden möglich, wie in Kapitel 3.1 (vgl. Thesen Psaraftis) erörtert wird,

⁶⁴ Die vorliegende Arbeit konzentriert sich ebenfalls auf ausgewählte Aspekte der zuvor aufgeführten Merkmale, da aufgrund der Komplexität von Tourenplanungsproblemen i. d. R. nur ein kleiner Teil dieser Merkmale untersucht bzw. beachtet werden kann.

⁶⁵ Vgl. Wöhe, G. (1996), S. 6 und Gutenberg, E. (1990), S. 190.

⁶⁶ Vgl. Weissermel, M. (1999), S. 10 f.

sofern ein Missverhältnis zwischen Erlös und Kosten vorliegt. Gleiches gilt für die gerade zuvor beschriebene, den klassischen Tourenplanungsmodellen und -verfahren zugrundeliegende Annahme, dass alle Kunden zu bedienen sind. Auch da könnten andere Zielfunktionen entworfen werden, die neben der Festlegung der Zuordnungs- und Reihenfolgeentscheidungen innerhalb des Tourenplans auch über die grundsätzliche Bedienung eines Kunden entscheiden. Denn bei einigen Problemstellungen, wie den Sammelgutverkehren bei Speditionen und KEP-Diensten, sind die Kunden nicht langfristig bekannt, so dass die Entscheidung über die Bedienung der Kunden nicht strategisch getroffen werden kann. Um dieses Problem zu vermeiden, erfolgt in der Praxis meist die Festlegung von Standardpreisen für die Bedienung von Kunden. Dies kann wiederum im Rahmen einer strategischen Planung geschehen. Sobald ein Kunde den Standardpreis akzeptiert, liegt er für die operative Tourenplanung vor. Eine Entscheidung über die Bedienung des Kunden ist auch in diesem Fall bei der Planung der Touren überflüssig. Bei der dynamischen Tourenplanung kann genauso verfahren werden, so dass, wenn ein dynamischer Kunde den Preis für die Auftragserfüllung akzeptiert, nur noch über seine kostengünstigste Integration in den bestehenden Tourenplan entschieden werden muss. Die angesprochene Festlegung von Standardpreisen kann anhand von Kalkulationen auf Basis von Erfahrungswerten erfolgen.

Zu Kosten, die ursächlich mit der Distribution in Verbindung stehen, gehören Abschreibungen auf den Fuhrpark, Versicherungskosten, Steuern und Wartungskosten für die Fahrzeuge, Personalkosten der Fahrer sowie Kosten für Treibstoffe, Schmieröle und andere Betriebsstoffe.⁶⁷ Bei der Wahl einer geeigneten Zielstellung bzw. Zielfunktion für die Tourenplanung ist das Wissen über die Art der Kosten, d. h. handelt es sich um fixe oder variable Kostenbestandteile, sowie über deren prozentuale Aufteilung von Vorteil. Fixe Kosten, die auch als leistungsunabhängige Kosten bezeichnet werden, sind Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen, Steuern, Versicherungskosten, Kosten der Fuhrparkverwaltung und Grundgehälter der Fahrer.⁶⁸ Zu den variablen Kosten, auch leistungsabhängige Kosten genannt, gehören Treibstoffkosten, Schmierstoffkosten, Kosten für Fahrpersonal, die von der gefahrenen Strecke bzw. Zeit abhängen (z. B. Überstundenkosten), sowie Ausgaben für Reparaturen, Wartung und Reifen.⁶⁹ ABERLE gibt an, dass die leistungsunabhängigen Kosten (ohne Fahrpersonalkosten) 33 - 35 % der Fahrzeugkosten, die leistungsabhängigen Kosten (ohne Fahrpersonalkosten) 30 - 33 % der Fahrzeugkosten und die Fahrpersonalkosten 30 - 36 % der Fahrzeugkosten ausmachen.⁷⁰

⁶⁷ Vgl. Weissermel, M. (1999), S. 11. Eine ausführliche Darstellung von Kostenarten der Distribution enthält die Arbeit von ERKENS. Vgl. Erkens, E. (1998), S. 47 ff.

⁶⁸ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 278 und Teichmann, S. (1989), S. 36 ff.

⁶⁹ Vgl. Erkens, E. (1998), S. 48 ff.

⁷⁰ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 278.

Fixe Kosten entstehen dementsprechend unabhängig von der tatsächlichen Durchführung der Touren, während variable Kosten durch die Fahr- bzw. Transportleistung verursacht werden, d. h. letztere sind nur vom tatsächlichen Fahrzeugeinsatz abhängig. Die Einsatzdauer oder die zurückgelegte Entfernung determinieren den Fahrzeugeinsatz.

Die Bestimmung der relevanten variablen und fixen Kostenbestandteile ist mit einigen Schwierigkeiten behaftet und deshalb oft nicht möglich. Nach WEISSERMEL ist infolgedessen die Kostenminimierung als direkte Zielsetzung der Tourenplanung nicht operational und muss daher durch eine geeignete Ersatzzielstellung substituiert werden.⁷¹ Derartige Ersatzzielstellungen, die in der Literatur zur Anwendung kommen, sind die *Minimierung der Zahl einzusetzender Fahrzeuge*, die *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen zurückzulegenden Entfernung* oder die *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen benötigten Fahrzeit*.⁷²

Die Verwendung einer Zielfunktion, die die *Minimierung der Zahl einzusetzender Fahrzeuge* verfolgt, resultiert aus der Einschätzung, dass der langfristig fixe Anteil der Distributionskosten, der von der Fuhrparkgröße abhängt, einen im Vergleich zu den kurzfristig variablen Kosten sehr hohen Wert aufweist. Allerdings ist die Anwendung nur selten sinnvoll, da die Fuhrparkgröße i. d. R. kurzfristig nicht variiert werden kann.

Für das Vorliegen einer schwankenden Nachfrage nach Transportleistungen, wie sie auch bei der dynamischen Tourenplanung auftritt, mit kurzfristig immer wieder neu zu erzeugenden Tourenplänen, ohne dass kurzfristig die Möglichkeit besteht, die Fuhrparkgröße zu variieren, oder ohne dass alternative Beschäftigungsmöglichkeiten für auftragsfreie Fahrzeuge vorliegen, wird in der Literatur als Zielsetzung die *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen zurückzulegenden Entfernung* vorgeschlagen.⁷³ Hervorgerufen durch unterschiedliche infrastrukturelle Gegebenheiten, die die resultierenden Durchschnittsgeschwindigkeiten bzw. diese die Treibstoffverbräuche beeinflussen, kann alternativ auch die *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen benötigten Fahrzeit* verfolgt werden. Die *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen zurückzulegenden Entfernung* und die *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen benötigten Fahrzeit* eignen sich als Zielfunktion dann besonders gut, wenn die Tourenplanung im Rahmen der operativen Tätigkeit eines Unternehmens erfolgt und vor allem sehr zeitnah durchgeführt wird.⁷⁴ Diese Zielfunktionen berücksichtigen mit der Entfernung und der Fahrzeit genau diejenigen Größen, welche sich

⁷¹ Vgl. Weissermel, M. (1999), S. 12.

⁷² Vgl. Domschke, W. (1997), S. 210 und Vogt, M. (1998), S. 28.

⁷³ Vgl. Weissermel, M. (1999), S. 12.

⁷⁴ Vgl. Weissermel, M. (1999), S. 15.

auf die variablen Kosten auswirken, die bei der operativen Planung beeinflusst werden sollen.

Aufgrund der geschilderten Charakteristika der einzelnen Zielstellungen erfolgt die Verwendung der *Minimierung der insgesamt von allen Fahrzeugen zurückzulegenden Entfernung* als Zielfunktion innerhalb der im Rahmen dieser Arbeit präsentierten Verfahren zur Rundreise- und Tourenplanung. Dies gilt sowohl für die aus der Literatur bekannten Modelle und Verfahren als auch für die durch den Autor neu entwickelten Modelle und Verfahren.

2.5 Komplexität von Tourenplanungsproblemen

Die exakte Lösung eines Tourenplanungsproblems erscheint generell sehr einfach, da aus allen möglichen Tourkombinationen diejenige mit den geringsten Kosten zu wählen ist. Allerdings steigt bei dieser Vorgehensweise, auch vollständige Enumeration genannt, mit zunehmender Problemgröße der Rechenaufwand extrem an, so dass diese Methode für die Praxis nicht anwendbar ist. Aufgrund dessen haben sich Wissenschaftler mit der Entwicklung geeigneter Verfahren befasst,⁷⁵ die eine optimale Lösung effizienter finden, d. h. weniger Rechenaufwand benötigen. Der Rechenaufwand, auch als Zeitkomplexität bezeichnet, gibt die maximale Anzahl an Elementarschritten (Rechenoperationen wie Addition, Multiplikation, Vergleiche, Sprünge usw.) an, die zur Lösung einer beliebigen Ausprägung eines Problems der Größe n notwendig sind.⁷⁶

Zur Beantwortung der Frage nach einer effizienten optimalen Lösung wird die Komplexitätstheorie herangezogen, anhand derer es möglich ist, Algorithmen hinsichtlich ihrer Effizienz und Problemstellungen nach ihrer Lösbarkeit zu beurteilen. Im Rahmen der Komplexitätstheorie wurde für einzelne Problemtypen auch untersucht, welcher Rechenaufwand für sie im ungünstigsten Fall erforderlich ist.⁷⁷ Darausfolgend ist eine Einteilung der Optimierungsprobleme in die Klasse der mit polynomialen Aufwand lösbaren Probleme (Klasse P) und in die Klasse der Probleme, die nicht mit polynomialen Aufwand lösbar sind (Klasse der NP-schweren Probleme), möglich.⁷⁸ Mit $O(f(n))$ wird die Größenordnung des Rechenaufwandes $R(n)$ (bzw. Zeitkomplexität) bezeichnet. Wenn die Funktion $f(n)$ (für hinreichend große n) ein

⁷⁵ Bspw. befassen sich Blasum, U. (2000), S. 80 ff., Edelbüttel, J. (1997), 25 ff., Hamdy, T. (2003), S. 390 ff., Laporte, G./ Nobert, Y. (1987), S. 147 ff., Laporte, G. (1992), S. 345 ff., Papadimitriou, C./ Steiglitz, J. (1982), S. 433 ff. und Toth, P./ Vigo, D. (2002), S. 29 ff. mit Verfahren zur exakten Lösung von TSP's und VRP's.

⁷⁶ Vgl. Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 189.

⁷⁷ Vgl. Domschke, W./ Drexl, A. (2005), S. 115.

⁷⁸ Vgl. Reeves, C. (1993), S. 8 f.

Polynom in Abhängigkeit von der Problemgröße n ist ($R(n)=O(n^k)$, mit $k \in \mathbb{N}$), so liegt ein polynomialer Aufwand vor, sonst handelt es sich um einen exponentiellen Aufwand.⁷⁹ Die Klasse der NP-schweren Probleme enthält Probleme, für die bislang kein Algorithmus existiert, der eines der Probleme garantiert mit polynomialen Rechenaufwand optimal löst, sondern die Verfahren dieser Gruppe benötigen einen exponentiellen Rechenaufwand.⁸⁰ Zur Klasse der polynomial lösbaren Probleme zählen beispielsweise Kürzeste-Wege-Probleme.⁸¹ Das Traveling Salesman Problem und das Tourenplanungsproblem gehören zur Klasse der NP-schweren Probleme.⁸²

Tourenplanungsprobleme zählen zu den schwierigsten Problemen der Kombinatorik, da es eine Reihe von Nebenbedingungen zu beachten gilt, die Lösung fast immer aus mehreren Touren statt nur aus einer Tour besteht und die beste bzw. eine gute Lösung aus einer Vielzahl von gültigen Varianten auszuwählen ist.⁸³ Infolge der Zugehörigkeit zur Klasse der NP-schweren Probleme gilt sowohl für das Standardproblem der Tourenplanung als auch für seine Erweiterungen, dass die Rechenzeit von Optimierungsalgorithmen im ungünstigsten Fall exponentiell mit der Problemgröße (Kundenzahl) wächst.

Das klassische Tourenplanungsproblem (statisches Vehicle Routing Problem (VRP)) ist ein Teilproblem des dynamischen Tourenplanungsproblems (Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)) - $P(\text{VRP}) \subset P(\text{DVRP})$ ⁸⁴, da beim klassischen VRP die Ankunftszeiten der Kundenaufträge auf den Zeitpunkt $ZP=0$ fixiert sind, während beim DVRP variable Ankunftszeiten vorliegen. Weil das klassische Tourenplanungsproblem NP-schwer ist, ergibt sich die Schlussfolgerung, dass auch das dynamische Tourenplanungsproblem NP-schwer sein muss, da es eine Verallgemeinerung des klassischen Tourenplanungsproblems (VRP) darstellt.⁸⁵ Somit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Zielstellung verfolgt, heuristische Lösungsverfahren zu ermitteln, die in wirtschaftlich sinnvoller Zeit eine akzeptable Lösung bestimmen.

⁷⁹ Vgl. Garey, M./ Johnson, D. (1999), S. 6.

⁸⁰ Vgl. Bousonville, T. (2002), S. 32.

⁸¹ Vgl. Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 191.

⁸² Vgl. Erkens, E. (1998), S. 23, Lenstra, J./ A. Rinnooy Kan (1981), S. 222 f. und Oertel, P. (2000), S. 13. In der euklidischen Ebene definierte Traveling Salesman Probleme und Vehicle Routing Probleme gehören ebenfalls zur Klasse der NP-schweren Probleme. Vgl. Garey, M. et al. (1976), S. 10 ff. und Papadimitriou, C. (1977), S. 237 ff.

⁸³ Vgl. Otten, H. (1998), S. 39.

⁸⁴ $P(\text{VRP})$ sei die Problemklasse der statischen Tourenplanungsprobleme und $P(\text{DVRP})$ die Problemklasse der dynamischen Tourenplanungsprobleme. Vgl. Larsen, A. (2001), S. 5.

⁸⁵ Vgl. dazu auch Lackner, A. (2003), S. 21 und Larsen, A. (2001), S. 5.

Tabelle 2-4 zeigt abschließend zur Verdeutlichung der Problematik das Laufzeitverhalten in Abhängigkeit vom Rechenaufwand und von der Problemgröße n . Dabei wird deutlich, dass gerade bei exponentiell wachsendem Rechenaufwand die zur exakten Lösung benötigte Zeit nicht vertretbare Ausmaße annimmt.

Problemklasse	Rechenaufwand	Größe des Problems		
		n=10	n=50	n=100
polynomial	n	0,00001 Sekunden	0,00005 Sekunden	0,0001 Sekunden
	n^2	0,0001 Sekunden	0,0025 Sekunden	0,01 Sekunden
	n^3	0,001 Sekunden	0,125 Sekunden	1 Sekunden
	n^5	0,1 Sekunden	5,21 Minuten	2,78 Stunden
exponentiell	2^n	0,001 Sekunden	35,7 Jahre	$4,1 \cdot 10^{16}$ Jahre
	3^n	0,059 Sekunden	$2,3 \cdot 10^{10}$ Jahre	$1,7 \cdot 10^{40}$ Jahre

Tab. 2-4: Rechenzeit in Abhängigkeit vom Rechenaufwand und von der Problemgröße
Annahme: Jede Rechenoperation dauert eine Mikrosekunde ($1 \cdot 10^{-6}$ Sekunden).
Quelle: In Anlehnung an Garey, M./ Johnson, D. (1999), S. 7.

2.6 Softwaregestützte Tourenplanung

Tourenplanungssoftwareprogramme stellen i. d. R. „Stand-alone-Lösungen“ dar, die über entsprechende Schnittstellen Daten mit anderen EDV-Systemen (z. B. Auftrags- und Fuhrparkverwaltung oder Fakturierung) austauschen.⁸⁶ Es kann unterschieden werden, ob die Software speziell für ein Unternehmen entwickelt wurde bzw. eine Eigenentwicklung darstellt, dann handelt es sich um Individualsoftware, oder ob es eine Standardsoftware ist. Ferner gibt es auch speziell für eine Branche konzipierte Tourenplanungssysteme, die einen Mittelweg zwischen den beiden zuvor genannten Varianten darstellen.⁸⁷

Moderne Tourenplanungssysteme weisen i. d. R. folgende Eigenschaften auf:⁸⁸

- modularer Aufbau, aufgrund dessen zum einen der Einsatz für verschiedenste Problemstellungen gesichert werden soll und zum anderen die Sicherung der Anpassungs- und Ausbaufähigkeit erfolgt
- Dialogkonzept und benutzerfreundliche Oberfläche i. d. R. unter MS-Windows
- digitalisierte Straßendaten, grafisch aufbereitete Ausgabe der Planungsergebnisse, tabellarische Darstellungen, Statistiken und Drucklisten zu den Planungsergebnissen
- die Planung kann wahlweise automatisch, interaktiv und/oder manuell erfolgen

⁸⁶ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59.

⁸⁷ Vgl. Diruf, G. (1999), S. 385.

⁸⁸ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59 f., Diruf, G. (1999), S. 385 und Vogt, M. (1998), S. 52 f.

- die Planung durch die Software erfolgt unter Nutzung mathematischer Optimierungsalgorithmen
- Berücksichtigung einer Vielzahl von relevanten Nebenbedingungen, z. B. Kundenzeitfenster, Fahrzeugkapazitäten, -einsatzzeiten und -ausstattung
- flexible Datenschnittstellen, die einen automatischen Import und Export der Daten ermöglichen
- Verknüpfung mit telematischen Komponenten, wie Mobilkommunikation, Satellitenortung, oder Bordcomputern (gilt nur für wenige Systeme)

Studien von BUCHHOLZ, NOVAK und VOGT zeigen, dass die Anzahl der Installationen von Software zur Tourenplanung gering ist und dass es aufgrund der Heterogenität dieses Marktes kaum Softwareherstellerfirmen gibt, die als Marktführer bezeichnet werden können.⁸⁹ Der geringe Anwendungsgrad resultiert hauptsächlich aus nicht quantifizierbaren Kostensenkungspotenzialen und aus dem Aspekt, dass Standardsoftware den sehr speziellen Anforderungen vieler Transportfirmen nicht entspricht.⁹⁰ Derartige spezielle Anforderungen sind die Berücksichtigung von kurzfristiger Veränderung der Tourenplanungsinputdaten (dynamische Tourenplanung), die Beachtung des Variantenreichtums und der Komplexität der Problemstellungen und der Unsicherheit der Inputdaten sowie die daher geforderte Abstimmung zwischen den Leistungsmerkmalen der Softwarekomponenten und den individuellen Anforderungen des Transportunternehmens. Weitere Ablehnungsgründe stellen der befürchtete hohe Datenpflegeaufwand (z. B. bei ständiger Änderung des Kundenstamms), Akzeptanzprobleme bei Disponenten, Fuhrparkleitern oder Fahrern sowie die fehlende Transparenz und Nachvollziehbarkeit einer automatisch durchgeführten Planung dar. Außerdem handelt es sich bei den Tourenplanungssystemen nicht immer um Komplettlösungen, die beispielsweise eine Integration von telematischen Komponenten, wie Bordcomputer, vollziehen.

Die Universität Karlsruhe präsentiert auf einer Internetseite ein laufend aktualisiertes Verzeichnis deutscher und internationaler Tourenplanungssoftware.⁹¹ Einen relativ aktuellen Marktüberblick bzgl. Softwareprogramme zur Tourenplanung geben auch verschiedenste Fachzeitschriften wie LOGISTIK HEUTE oder TRANSPORTING.⁹² Die Übersichten enthalten neben einer Bewertung der Programme auch Angaben zu den Investitionskosten und

⁸⁹ Vgl. Buchholz, J. et al. (1998), S. 223, Novak, B. (1999), S. 442 und Vogt, M. (1998), S. 54. Siehe auch Bargl, M. (1994), S. 39.

⁹⁰ Vgl. Vahrenkamp, R. (2003), S. 255 und S. 257 sowie Diruf, G. (1999), S. 385 f. RÖSCHER gibt zum Beispiel einen Überblick über die in der Praxis vorzufindenden Restriktionen. Vgl. Rösch, P. (1993), S. 25 ff.

⁹¹ Vgl. Universität Karlsruhe (TH) - Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research (WIOR) (2004), www.wior.uni-karlsruhe.de/bibliothek/vehicle/com (Abgerufen am: 27.10.2004).

⁹² Vgl. Logistik heute (2001), S. 37 ff. und Transporting (2003), S. 16 f.

laufenden Kosten. Nach VAHRENKAMP sind die hohen Soft- und Hardwarekosten sowie die schwer abzuschätzenden Schulungs-, Einarbeitungs-, Beratungs- und Datenerhebungskosten demzufolge weitere Hemmnisse.⁹³

Realisierte bzw. erwartete Vorteile durch den Einsatz eines rechnergestützten Tourenplanungssystems sind die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit (z. B. geringere Touranzahl, Verkürzung der zu fahrenden Gesamtstrecke, mehr Stopps pro Tour oder bessere Auslastung der Fahrzeuge), geringere Fehlerquote bei der Disposition, eine bessere Kosten- und Lieferservicetransparenz, eine bessere Überprüfbarkeit von Subunternehmen bzw. Speditionen, kürzere Dispositionszeiten, schnellere Reaktionszeiten auf geänderte Kundenanforderungen und ein verbesserter Informationsfluss innerhalb des Unternehmens.⁹⁴

2.7 Modelle und Verfahren zur Rundreise- und Tourenplanung

Im Folgenden werden sowohl mathematische Modelle zur Formulierung als auch Verfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemen vorgestellt. Zuerst erfolgt die Betrachtung von Modellen und Verfahren zur Rundreisepaltung. Bei Rundreiseproblemen (Traveling Salesman bzw. Chinese Postman Probleme) handelt es sich um einen Spezialfall der Tourenplanungsprobleme, bei dem die Kapazität der Fahrzeuge unbeschränkt bzw. kein Bedarf je Kunde zu beachten ist.⁹⁵ Tourenplanungsprobleme werden daher, wie bereits erwähnt, auch als verallgemeinerte Traveling Salesman bzw. Chinese Postman Probleme bezeichnet. Des Weiteren beinhalten einige Verfahren zur Tourenplanung, z. B. der Sweep-Algorithmus, die Anwendung von Rundreisealgorithmen als Teilschritte. Im Anschluss an die Rundreisepaltung erfolgt die Darstellung von Modellen und Verfahren zur Tourenplanung.

2.7.1 Grundlegende Begriffe und Klassifizierung der Verfahren

Zur besseren Beschreibung von Tourenplanungsproblemen sind zuvor einige Begriffe zu erklären:

- Depot: An diesem Ort beginnen und enden die Sammel- oder Auslieferungsfahrten. Hier ist der Fuhrpark stationiert.

⁹³ Vgl. Vahrenkamp, R. (2003), S. 255.

⁹⁴ Vgl. Eibl, P. (1996), S. 45 ff., Vahrenkamp, R. (2003), S. 255 und Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59 f. Insbesondere EIBL befasst sich mit den durch den Einsatz einer computergestützten Tourenplanung verbundenen Vorteilen sehr ausführlich.

⁹⁵ Vgl. Kapitel 2.3.

- Tour: Im klassischen Fall (statische Tourenplanung) beinhaltet eine Tour alle Kunden, die durch ein Fahrzeug auf ein und denselben am Depot beginnenden und endenden Fahrt bedient werden. In dieser Arbeit bei der dynamischen Tourenplanung kann auch die Bildung von Touren erfolgen, deren Start- und Zielpunkt verschieden ist. Die Fahrt von dem Startpunkt zum Zielpunkt und die Bedienung aller dazwischen liegenden Kunden wird hier ebenfalls als Tour bezeichnet.
- Route: Diese gibt die Reihenfolge an, in der die Bedienung der Kunden innerhalb einer Tour stattfindet.
- Tourenplan: Dieser fasst alle Touren zusammen, die zur Erfüllung eines Tourenplanungsproblems notwendig sind. Er stellt eine zulässige Lösung eines Tourenplanungsproblems dar, der alle Restriktionen erfüllt.

Bei den Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme findet eine Differenzierung in exakte und heuristische Lösungsverfahren statt. Exakte Verfahren lösen ein gegebenes Problem optimal. Eine Heuristik hingegen bestimmt für eine gegebene Problemstellung in begrenzter Zeit eine mehr oder weniger gute, zulässige Lösung. Hierzu werden bestimmte Vorgehensregeln zur Lösungsfindung bzw. -verbesserung angewendet, die hinsichtlich des angestrebten Ziels und unter Berücksichtigung der Problemstruktur sinnvoll, zweckmäßig und erfolgversprechend erscheinen.⁹⁶ Heuristische Lösungsverfahren garantieren jedoch nicht das Auffinden von Optimallösungen. Mit zunehmender Problemgröße verfehlen Heuristiken i. d. R. das Optimum. Dafür benötigen sie einen geringeren Rechenaufwand als exakte Verfahren. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes lösen exakte Verfahren nur Probleme mit beschränkter Größe in vertretbarer Zeit.⁹⁷ Infolgedessen sind sie in der Praxis kaum anwendbar und deshalb auch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Auch kommerzielle Softwareanwendungen nutzen aufgrund der geforderten geringen Rechenzeit meist heuristische Verfahren.

2.7.2 Methoden der Rundreiseplanung

Das Rundreiseproblem ist ein Spezialfall der Tourenplanung, bei dem keine Kapazitäten zu beachten sind. Damit ergibt sich als Ergebnis nur eine Tour - die Rundreise. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich knotenorientierte Rundreiseprobleme, d. h. Traveling

⁹⁶ Vgl. Vahrenkamp, R. (2003), S. 28.

⁹⁷ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 234 und Homberger, J. (2000), S. 62 ff. HOMBERGER zeigt die Anwendung verschiedener exakter Verfahren auf die 1987 von SOLOMON generierten Probleminstanzen (Vgl. Solomon, M. (2004): <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>). Dabei zeigt sich, dass i. d. R. höchstens Planungsprobleme mit einer Größe von 50 Kunden, des öfteren aber auch nur mit 25 Kunden exakt gelöst werden können.

Salesman Probleme, betrachtet und keine kantenorientierten Rundreiseprobleme (Chinese Postman Probleme). Das Rundreiseproblem, speziell das Traveling Salesman Problem, sei wie folgt definiert:

Gegeben sei ein ungerichteter bewerteter vollständiger Graph $G=(V,E,c)$, wobei $V=\{0,1,\dots,n\}$ die Knotenmenge und $E=\{[i,j] : i,j \in V, i < j\}$ die Kantenmenge des Graphen ist. Der Knoten 0 repräsentiert das Depot, alle übrigen Knoten stellen die Kunden dar. Die Bewertungsmatrix C mit den Elementen c_{ij} bezieht sich auf die Kantenmenge E . Die Bewertungen c_{ij} der Kanten können beispielsweise Kosten, Entfernungen oder Fahrzeiten sein. In dieser Arbeit stellt c_{ij} Entfernungen dar. Da es sich um einen ungerichteten Graph handelt, hat die Bewertungsmatrix eine symmetrische Gestalt. Für die folgenden Verfahren soll eine vollständige Bewertungsmatrix C , bei der alle Werte c_{ij} bestimmt sind, vorliegen. Dabei gibt c_{ij} die kürzeste Entfernung von Knoten i zu Knoten j an. Im Rahmen dieser Arbeit ist das Tourenplanungsproblem und das Traveling Salesman Problem (Rundreiseproblem) in der euklidischen Ebene definiert und die Bestimmung der Distanzen zwischen allen Knoten $i, j \in V$ erfolgt unter Verwendung der euklidischen Distanz $c_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ (mit (x_i, y_i) und (x_j, y_j) Koordinaten der Kundenstandorte i und j). Würde ein Straßennetz und damit i. d. R. ein unvollständiger Graph vorliegen, können durch das Lösen von kürzeste Wegeproblemen⁹⁸ ebenfalls alle Werte c_{ij} der Bewertungsmatrix C ermittelt werden. Ziel ist es, die Rundreise so zu bestimmen, dass die Summe aller Bewertungen c_{ij} der Kanten $[i,j]$, die zur Bedienung aller Kunden benutzt werden, minimal ist, alle Kunden in dieser Rundreise enthalten sind, d. h. genau einmal besucht werden, und die Rundreise am Depot beginnt und endet.

Variablen und Parameter:

x_{ij} Binäre Variable, die angibt, welche Kanten die Rundreise enthält und welche nicht:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls die Kante } [i,j] \text{ in der Rundreise enthalten ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad \text{mit } i, j = 0, \dots, n \text{ und } i < j$$

c_{ij} Reellwertiges Element der Kostenmatrix C des gegebenen Graphen

V Knotenmenge mit $i \in V, i = 1, \dots, n$ Kunden und $i = 0$ Depot, $V = \{0, 1, \dots, n\}$

A Teilmenge von V zur Überprüfung auf Kurzzyklen

⁹⁸ Vgl. zu kürzeste Wegeproblemen bspw. Neumann, K. (1992), S. 52 ff., Neumann, K./Morlock, M. (2002), S. 203 und Noltemeier, H. (1976), S. 97 ff. Eine Methode zur Bestimmung der kürzesten Wege zwischen allen Knoten eines Graphen ist z. B. der Tripelalgorithmus nach FLOYD. Vgl. dazu Neumann, K./Morlock, M. (2002), S. 219 ff. und Neumann, K. (1992), S. 75 ff.

Das **symmetrische Traveling Salesman Problem** (TSP) lässt sich wie folgt formulieren:⁹⁹

$$\text{ZF: } \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (2.1)$$

$$\text{NB: } \sum_{h=0}^{i-1} x_{hi} + \sum_{j=i+1}^n x_{ij} = 2 \quad \text{für alle } i = 0, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{\substack{j \in V \setminus A \\ i < j}} x_{ij} + \sum_{i \in V \setminus A} \sum_{\substack{j \in A \\ i < j}} x_{ij} \geq 2 \quad \text{für alle } A \subset V \text{ mit } 2 \leq |A| \leq \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil^{100} \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{für alle } i, j = 0, \dots, n; i < j \quad (2.4)$$

Nach der Zielfunktion (2.1) erfolgt die Bestimmung der Rundreise mit den geringsten Kosten. Die Nebenbedingung (2.2) stellt sicher, dass jeder Knoten i genau einmal erreicht und verlassen wird. Dem Ausschluss von Kurzzyklen dient Nebenbedingung (2.3). Sie wird als 2-Matching-Relaxation bezeichnet und beinhaltet folgende Wirkungsweise:¹⁰¹ $(A, V-A)$ ist eine beliebige Zerlegung der Knotenmenge des gegebenen Graphen $G=(V, E, c)$. Von je zwei zueinander komplementären Zerlegungen $(A=\{1,4,6\}, V-A=\{0,2,3,5\})$ und $(A=\{0,2,3,5\}, V-A=\{1,4,6\})$ reicht eine Bedingung aus, deshalb gilt $|A| \leq \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil$. Die Abbildung 2-4 zeigt im linken und im mittleren Fall eine gültige Variante und der rechte Fall veranschaulicht eine Variante, bei der durch die Mengen A und $V-A$ Kurzzyklen aufgedeckt werden.

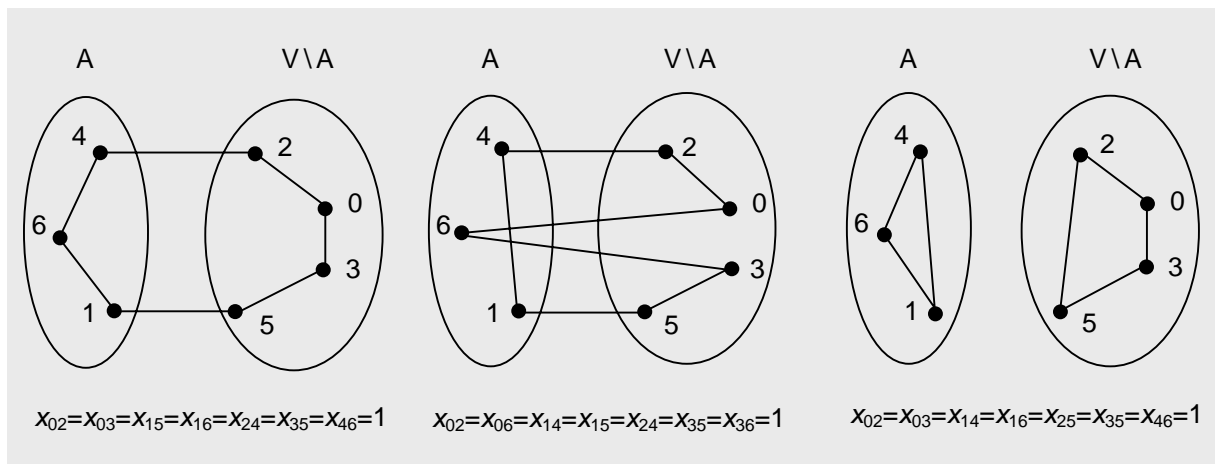


Abb. 2-4: Vermeidung von Kurzzyklen beim TSP

Quelle: In Anlehnung an Domschke, W. (1997), S. 106.

⁹⁹ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 108 f.

¹⁰⁰ $\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil = \min_{z \in \mathbb{N}} z, z \geq \frac{n}{2}$

¹⁰¹ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 106.

Im Folgenden werden die drei heuristische Lösungsverfahren „Bester Nachfolger“, „Sukzessive Einbeziehung“ und „Christofides“ zur des Lösung Traveling Salesman Problems vorgestellt.¹⁰² Hinzu kommt noch das „Savingsverfahren“, auf das an dieser Stelle nicht eingegangen wird, da dessen Erklärung ausführlich in Kapitel 2.7.3 für Tourenplanungsprobleme erfolgt. Diese vier Verfahren spielen im weiteren Verlauf der Arbeit eine Rolle, da sie auf das dynamische Traveling Salesman Problem übertragen werden. Die Verfahren Bester Nachfolger, Sukzessive Einbeziehung und das Savingsverfahren wurden unter der Vielzahl von existierenden Algorithmen ausgewählt, da sie häufig für praktische Probleme empfohlen werden.¹⁰³ Das Verfahren von Christofides wird des Öfteren beschrieben, weil hier sehr einfach eine Worst-Case-Schranke für die Güte der damit erzielbaren Lösung angegeben werden kann.¹⁰⁴ Alle vier Verfahren werden des Weiteren oft in der Literatur behandelt.¹⁰⁵

Verfahren des besten Nachfolgers:

Zur Bildung einer Rundreise erfolgt beim Verfahren des besten Nachfolgers zuerst die Bestimmung des Startknoten, welcher hier das Depot $v_0 \in V$ sein soll. In jeder Iteration i ($=1,2,\dots,n$) wird der Rundreise stets derjenige noch nicht in ihr befindliche Knoten $v_i \in V$ hinzugefügt, der zu Knoten $v_{i-1} \in V$ die geringste Entfernung aufweist. Entsprechend der Auswahlreihenfolge der Knoten ergibt sich die für den Handelsreisenden (Traveling Salesman) zu fahrende Rundreise.

Algorithmus „Bester Nachfolger“:

Start: Das Depot ist der Startknoten $v_0 \in V$; Länge der Rundreise ist $L=0$.

Iteration i ($=1,2,\dots,n$): Suche den (bei Gleichheit einen beliebigen) Knoten $v_i \in V$ mit

$$c_{v_{i-1}v_i} = \min \{c_{v_{i-1}j} \mid j \neq v_0, \dots, v_{i-1}\};$$

Es wird die Kette $[v_0, v_1, \dots, v_{i-1}, v_i]$ gebildet mit $L := L + c_{v_{i-1}v_i}$.

Ergebnis: Es ergibt sich eine Rundreise $[v_0, v_1, \dots, v_n, v_0]$ mit der Länge

$$L := L + c_{v_n v_0}.$$

¹⁰² Vgl. zu den heuristischen Lösungsverfahren Domschke, W. (1997), S. 110 ff., Junnickel, D. (1994), S. 533, Uhr, W./ Lasch, R. (2003), S. B3.5.1.2.2., Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 445 ff., Reinelt, G. (1994), S. 73 ff., Vahrenkamp, R. (2003), S. 204 ff. sowie Zimmermann, W. (1999), S. 151 f. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Verfahren für das Traveling Salesman Problem. Vgl. hierzu die aufgeführten Quellen.

¹⁰³ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 110.

¹⁰⁴ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 110.

¹⁰⁵ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 110 ff., Uhr, W./ Lasch, R. (2003), S. B3.5.1.2.2. und Reinelt, G. (1994), S. 73 ff.

Verfahren der sukzessiven Einbeziehung:¹⁰⁶

Das Verfahren der sukzessiven Einbeziehung startet mit der Bildung einer Kurzzundreise K , die sich aus dem festgelegten Startknoten (Depot) $v_0 \in V$ und dem Knoten $v_1 \in V$, der die größte Entfernung zum Startknoten aufweist, zusammensetzt. In den folgenden Iteration i ($=2,3,\dots,n$) erfolgt die sukzessive Vergrößerung dieser Kurzzundreise K um jeweils einen weiteren Knoten k . Dabei wird immer der Knoten k gewählt, dessen minimale Distanz zu einem der bereits in der Kurzzundreise K enthaltenen Knoten $v_k \in K$ maximal ist. Das Einfügen des ausgewählten Knotens k in die Kurzzundreise K erfolgt an der Stelle, bei der sich die Länge der Kurzzundreise K am wenigsten erhöht.

Algorithmus „Sukzessive Einbeziehung“:

Start: Das Depot ist der Startknoten $v_0 \in V$ und ermittle Knoten $v_1 \in V$ mit

$$c_{v_0 v_1} = \max \{c_{v_0 i} \mid i \neq v_0\};$$

Bilde Kurzzundreise $K=[v_0, v_1, v_0]$ mit $L:=2 \cdot c_{v_0 v_1}$.

Iteration i ($=2,3,\dots,n$): Bestimme Knoten $k \notin K$ und $v_k \in K$ so, dass

$$c_{v_k k} = \max_{l \notin K} \min_{v_h \in K} c_{v_h l}$$

sowie eine Kante $[v_m, v_{m+1}]$ auf K mit

$$\delta := c_{v_m k} + c_{k v_{m+1}} - c_{v_m v_{m+1}} = \min \{c_{v_h k} + c_{k v_{h+1}} - c_{v_h v_{h+1}} \mid h = 0, \dots, i-1\}$$

und füge den Knoten k zwischen v_m und v_{m+1} ein; $L:=L+\delta$.

Ergebnis: Es ergibt sich eine Rundreise $[v_0, v_1, \dots, v_n, v_0]$ mit der Länge L .

Zur Auswahl eines Knotens k in jeder Iteration i ($=2,3,\dots,n$) gibt es eine Vielzahl von Varianten.¹⁰⁷ REINELT hat in seinen Tests jedoch die hier beschriebene Variante, bei der der Knoten ausgewählt wird, dessen minimale Distanz zu einem der bereits in der Kurzzundreise K enthaltenen Knoten $v_k \in K$ maximal ist, im Allgemeinen als beste identifiziert.¹⁰⁸

Sowohl beim Verfahren des besten Nachfolgers als auch bei der Sukzessiven Einbeziehung beträgt der Rechenaufwand $O(n^2)$.¹⁰⁹ Die sukzessive Einbeziehung bestimmt i. d. R. kürzere

¹⁰⁶ Das Verfahren der sukzessiven Einbeziehung wurde von KARG/THOMSON entwickelt. Vgl. Karg, R./ Thomson, G. (1964), S. 225 ff.

¹⁰⁷ Ausführliche Erläuterungen zu den verschiedenen Auswahlmöglichkeiten stellt bspw. REINELT dar. Vgl. Reinelt, G. (1994), S. 82 f.

¹⁰⁸ Vgl. Reinelt, G. (1994), S. 84 und auch Domschke, W. (1997), S. 112.

¹⁰⁹ Vgl. Reinelt, G. (1994), S. 74 u. S. 83.

Rundreisen als der Algorithmus des besten Nachfolgers, jedoch wird hierfür eine längere Rechenzeit benötigt.¹¹⁰

Verfahren von Christofides:¹¹¹

Das Verfahren von Christofides beginnt mit der Bestimmung des Minimalgerüsts SST im Graph G , für dessen Knoten ein Traveling Salesman Problem zu lösen ist. In einem nächsten Schritt werden im Minimalgerüst SST die Knotengrade ermittelt. Für alle Knoten mit ungeradem Knotengrad erfolgt die Bildung eines vollständigen Graphen $G'=(V', E', c')$, wobei die Kantenbewertungen c' denen des Ausgangsgraphen G entsprechen. Als Nächstes wird ein minimales Summen-Matching \tilde{E}^* in G' gelöst. Die Kanten aus \tilde{E}^* werden zu SST hinzugefügt, sodass sich $MSST$ ergibt. In $MSST$ erfolgt abschließend ausgehend vom Startknoten v_0 die Bestimmung einer Eulertour, aus der der eingebettete Hamilton-Kreis extrahiert wird. Zuletzt müssen die Verbindungen zwischen zwei benachbarten Knoten des Hamilton-Kreises dahingehend überprüft werden, ob es sich tatsächlich um die kürzeste Verbindung handelt. Unter Umständen werden indirekte Verbindungen durch direkte Verbindungen ersetzt. Denn es gilt zu beachten, dass durch die Eulertour lediglich die Reihenfolge der Knoten im Hamilton-Kreis festgelegt wird, jedoch nicht zwingend die kürzeste Route.

Algorithmus von Christofides:

- Schritt 1: Bestimme ein Minimalgerüst SST von Graph G .
- Schritt 2: Bestimme $V'=\{v_i \in V \mid \text{Knotengrad } KG_{v_i} \text{ ungerade in } SST\}$; $|V'|$ ist gerade.
 Bilde einen vollständigen Graphen $G'=(V', E', c')$ mit
 $c'_{v_i v_j}$ = Länge der kürzesten Kette zwischen Knoten v_i und v_j in G .
 Bestimme ein minimales Summen-Matching \tilde{E}^* in G' .
 Füge die Kanten von \tilde{E}^* zu SST hinzu $\rightarrow MSST$.
- Schritt 3: Bestimme die Eulertour t in $MSST$ ausgehend vom Startknoten v_0 ; extrahiere den in die Eulertour eingebetteten Hamilton-Kreis K .

¹¹⁰ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 111. Bei kleineren und mittleren Problemgrößen beträgt die Rechenzeit der Sukzessiven Einbeziehung ungefähr das 2,5-fache der des Besten Nachfolgers.

¹¹¹ Die Begriffe "Minimalgerüst", "Knotengrad", "minimales Summen-Matching", "Euler-Tour" und "Hamilton-Kreis" werden in Anhang A7 erklärt.

Zu ergänzen ist, dass sich für das Verfahren von Christofides eine Abschätzung des maximalen Fehlers (bezogen auf die tatsächlich optimale Rundreise) durchführen lässt. Folgende Worst-Case-Schranke kann angegeben werden: Die Länge des mit Christofides bestimmten Hamilton-Kreises ist höchstens um 50% länger als die Länge der optimalen Lösung.¹¹² Das Verfahren von Christofides ist dementsprechend eine $\frac{1}{2}$ -approximative Heuristik. Voraussetzung für diese Worst-Case-Analyse ist allerdings die Einhaltung der Dreiecksungleichung, bei der für alle paarweise verschiedenen Knoten i , j und k gilt: $c_{ik} \leq c_{ij} + c_{jk}$. Der Rechenaufwand beim Verfahren von Christofides beträgt $O(n^3)$.¹¹³ Verantwortlich für den höheren Aufwand als bei den zwei zuvor beschriebenen Heuristiken ist der Aufwand für die Lösung des minimalen Summen-Matchings.

Nachdem Eröffnungsverfahren zur Konstruktion einer Traveling Salesman Tour vorgestellt wurden, soll noch kurz auf lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren eingegangen werden. Das Grundprinzip aller Verbesserungsverfahren ist durch Tauschoperationen eine gegebene Lösung zu verbessern, indem Kanten der Ausgangslösung durch neue Kanten ersetzt werden. Das **2-opt-Verfahren** als klassisches Verbesserungsverfahren, aus dem Bereich der Rundreiseplanung, welches stellvertretend für die anderen Verfahren hier vorgestellt werden soll, versucht beispielsweise die Reihenfolge der Kunden in einer Tour zu optimieren, indem der Reihe nach jeweils zwei Kanten $[i, i+1]$ sowie $[j, j+1]$ aus der vorliegenden Lösung mit den zwei Kanten $[i, j]$ sowie $[i+1, j+1]$, die bis jetzt nicht in der Lösung enthalten sind, verglichen werden.¹¹⁴ Würde bei Tausch eine Verbesserung entstehen, erfolgt die Durchführung des Tausches. Danach beginnt das Verfahren mit den Paarvergleichen wieder von vorn bis zum nächsten profitablen Tausch.¹¹⁵ Wird überhaupt kein profitabler Tausch gefunden, bricht das Verfahren ab. Beim sogenannten 3-opt-Verfahren werden in jeder Iteration drei Kanten entfernt und durch drei neue ersetzt. Das 2-opt- und 3-opt-Verfahren sind ein Spezialfall der r -opt-Verfahren.¹¹⁶ Da die Lösungsgüte für große r nur geringfügig ansteigt, erfolgt in der Praxis meist nur die Anwendung des 2-opt- und 3-opt-Verfahrens,¹¹⁷ wobei das 2-opt-Verfahren schneller ist als das 3-opt-Verfahren, allerdings das 3-opt-Verfahren eine bessere

¹¹² Vgl. Domschke, W. (1997), S. 114.

¹¹³ Vgl. Reinelt, G. (1994), S. 92.

¹¹⁴ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-58 f. und Eiselt, H./ Sandblom, C.-L. (2000), S. 331 ff.

¹¹⁵ Diese Vorgehensweise, bei der die erste gefundene Verbesserung sofort umgesetzt wird und das Verfahren wieder am Anfang startet, trägt die Bezeichnung first-fit-Strategie. Es existieren allerdings auch Verbesserungsverfahren, die nicht immer zum Anfang zurückkehren, sondern dort ansetzen, wo die letzte Verbesserung zu Veränderungen geführt hat. Vgl. Reinelt, G. (1994), S. 105 ff.

¹¹⁶ Erste Beschreibungen zum 2-opt-Verfahren stammen von CROES und zum 3-opt-Verfahren von LIN. Vgl. Croes, G.A. (1958), S. 791 ff. und Lin, S. (1965), S. 2245 ff.

¹¹⁷ Vgl. Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 452.

Lösungsgüte als das 2-opt-Verfahren erzielt.¹¹⁸ Die r -opt-Verfahren werden als gute und sehr schnelle Näherungsverfahren bezeichnet.¹¹⁹

2.7.3 Methoden der Tourenplanung

Das klassische Tourenplanungsproblem kann folgendermaßen definiert werden:¹²⁰ Wie beim Traveling Salesman Problem (vgl. Kapitel 2.7.2) sei ein ungerichteter bewerteter vollständiger Graph $G=(V,E,c)$, mit Knotenmenge $V=\{0,1,\dots,n\}$, Kantenmenge $E=\{[i,j] : i,j \in V, i < j\}$ und Bewertungsmatrix $C=(c_{ij})$ gegeben. Auch hier wird eine vollständige Bewertungsmatrix unter Verwendung der euklidischen Distanz $c_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ (mit (x_i, y_i) und (x_j, y_j) Koordinaten der Kundenstandorte i und j) bestimmt. Die Annahmen des klassischen Tourenplanungsproblems sind, dass jeder Kunde i ($i=1,\dots,n$) einen nicht-negativen Bedarf b_i hat und dass eine unbeschränkte Fahrzeugflotte von identischen Fahrzeugen mit beschränktem Fassungsvermögen (Kapazität) Q existiert, die am Depot $i=0$ stationiert ist. Die Aufgabe beim klassischen Tourenplanungsproblem besteht darin, einen Tourenplan, der aus TA Einsammel- bzw. Auslieferungstouren besteht, zu ermitteln. Dabei muss der Tourenplan folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Jede Tour beginnt und endet am Depot.
- Jeder Kunde wird genau durch ein Fahrzeug bedient.
- Die Summe der Bedarfe b_i der Kunden $i \in V$ einer Tour darf die Fahrzeugkapazität Q nicht überschreiten.
- Es erfolgt die Minimierung der Summe aller Bewertungen c_{ij} der Kanten $[i,j]$, die zur Bedienung der Kunden im Rahmen des Tourenplans benutzt werden.¹²¹

¹¹⁸ Vgl. Gietz, M. (1994), S. 97. Bei dem von OR (1976) entwickelten Or-opt-Verfahren handelt es sich um einen Kompromiss zwischen den kurzen Rechenzeiten des 2-opt-Verfahrens und der Lösungsgüte des 3-opt-Verfahrens. Es werden nur diejenigen Tauschversuche überprüft, die eine zusammenhängende Kette von k benachbarten Knoten (zunächst $k=3$ Knoten danach $k=2$ Knoten und schließlich $k=1$ Knoten) einer Tour herauslösen und an einer anderen Stelle der Tour wieder einfügen, so dass eine Verbesserung erzielt wird. Vgl. Or, I. (1976), S. 1 ff.

¹¹⁹ Vgl. bspw. Christofides, N./ Eilon, S. (1972), S. 511 ff.

¹²⁰ Vgl. Fisher, M. (1995), S. 1 f.

¹²¹ Weitere Anforderungen, die aufgenommen werden können – allerdings aber nicht zum Standardproblem gehören, sind die Einführung einer Beschränkung D für die maximale Tourdauer oder die Beachtung von Kundenzeitfenstern $[e_i, l_i]$, mit e_i früheste Ankunftszeit und l_i späteste Ankunftszeit. Dabei ist auch die Standzeit SZ_i des Fahrzeuges beim Kunden i zu beachten, die aus der Bedienung des Kunden i resultiert.

Aufgrund der verbalen Definition lässt sich das symmetrische Tourenplanungsproblem (Vehicle Routing Problem (VRP)) wie folgt formulieren:¹²²

Variablen und Parameter:

V	Knotenmenge mit $i \in V$, $i = 1, \dots, n$ Kunden und $i = 0$ Depot, $V = \{0, 1, \dots, n\}$
x_{ij}	Binärvariable, mit $i, j = 1, \dots, n$ und $i < j$, $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls Kante } [i, j] \text{ benutzt wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
x_{0j}	Verbindung zwischen Depot und Kunde j , $x_{0j} \in \{0, 1, 2\}$ ($x_{0j} = 2$, wenn Pendeltour zwischen Depot und j existiert)
c_{ij}	Bewertung der Kante (bzw. Verbindung) von Kunde i zu Kunde j
c_{0j}	Bewertung der Kante (bzw. Verbindung) zwischen Depot und Kunde j
A	Teilmenge von V , die zur Überprüfung auf Kurzyklen benutzt wird
b_i	Bedarf des Kunden i , $i = 1, \dots, n$
Q	maximale Fahrzeugkapazität

*Formale Beschreibung des Modells*¹²³

$$\text{ZF: } \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (2.5)$$

$$\text{NB: } \sum_{h=0}^{i-1} x_{hi} + \sum_{j=i+1}^n x_{ij} = 2 \quad \text{für alle } i = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{\substack{j \in V \setminus A \\ i < j}} x_{ij} + \sum_{i \in V \setminus A} \sum_{\substack{j \in A \\ i < j}} x_{ij} \geq 2r(A) \quad \text{für alle } A \subseteq V \setminus \{0\} \text{ und } |A| \geq 2 \quad (2.7)$$

$$\text{mit } r(A) = \left\lceil \frac{\sum_{i \in A} b_i}{Q} \right\rceil$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{für alle } i, j = 1, \dots, n; i < j \quad (2.8)$$

$$x_{0j} \in \{0, 1, 2\} \quad \text{für alle } j = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

Durch die Zielfunktion (2.5) wird der Tourenplan mit der geringsten Gesamtlänge aller Touren bestimmt. Die Nebenbedingung (2.6) stellt sicher, dass jeder Knoten i genau einmal erreicht und verlassen wird. Dem Ausschluss von Kurzyklen, die das Depot nicht enthalten, dient Nebenbedingung (2.7).

¹²² Vgl. Domschke, W. (1997), S. 217 und Toth, P./Vigo, D. (2002), S. 14.

¹²³ In Anlehnung an Toth, P./Vigo, D. (2002) wird auf die von Domschke, W. (1997), S. 217 gewählte Nebenbedingung „ x repräsentiert einen M -Baum“ verzichtet. Diese Nebenbedingung dient zur Bestimmung unterer Schranken für die Zielfunktionswerte des symmetrischen Tourenplanungsproblems, ist aber für die „reine“ Beschreibung der Struktur des Modells (der Tourenpläne) nicht notwendig. Vgl. Domschke, W. (1997), S. 216 f.

Zur Lösung von knotenorientierten Tourenplanungsproblemen können prinzipiell exakte und heuristische Verfahren verwendet werden (vgl. Abb. 2-5).

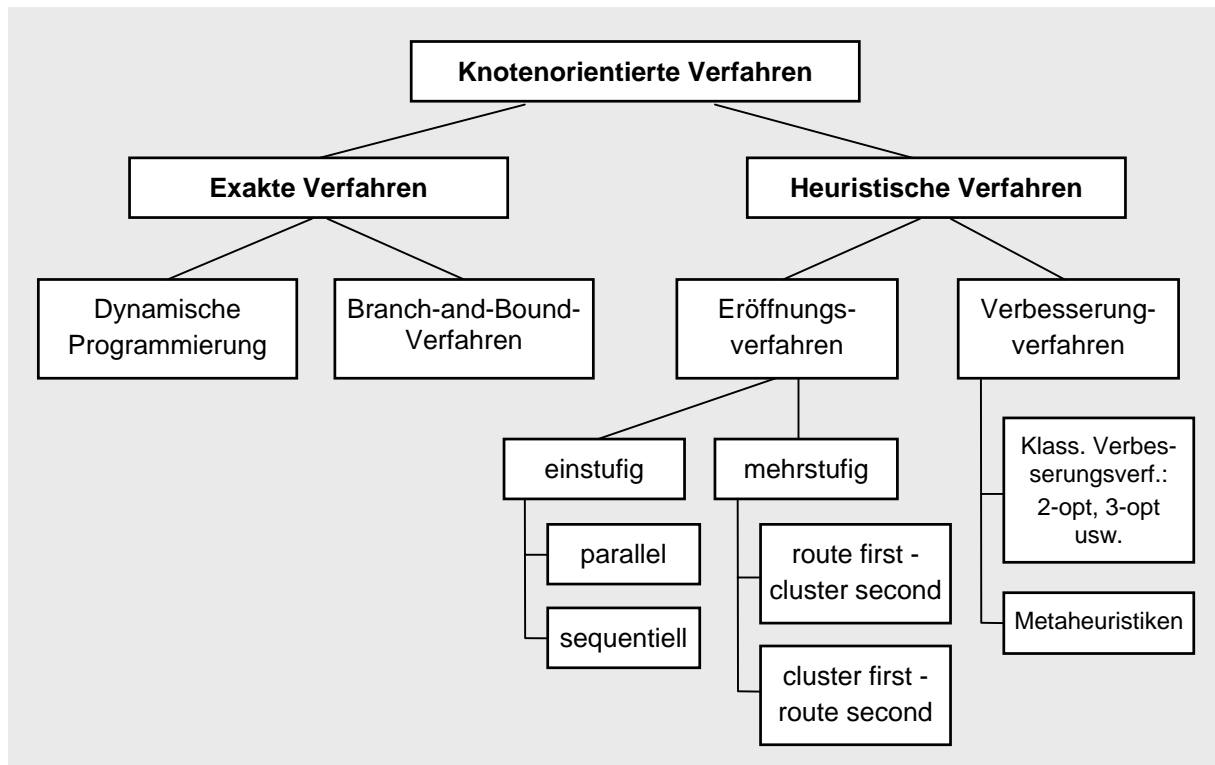


Abb. 2-5: Lösungsverfahren zur Tourenplanung
Quelle: In Anlehnung an Aberle, G. (2003), S. 541.

Die dynamische Programmierung, bei der die sukzessive Einbeziehung aller Knoten erfolgt, und das Branch-and-Bound-Verfahren, bei dem durch Lockerung oder Nichtberücksichtigung von Nebenbedingungen die Lösung sukzessive eingegrenzt wird (sogenannte Relaxationen), gehören zu den **exakten Verfahren** und liefern ein Ergebnis in endlich vielen Schritten.¹²⁴ Grundsätzlich findet beim Branch-and-Bound-Verfahren die Verzweigung eines gegebenen Problems in Teilprobleme (Branching) sowie die Ermittlung von Schranken für die Zielfunktionswerte der Teilprobleme und das Ausloten von Teilproblemen (Bounding) statt.¹²⁵ Das bedeutet, es erfolgt die Aufspaltung aller Lösungsvarianten in einem Möglichkeitsbaum. Ein Ast dieses Baumes und damit alle sich daraus ergebenden Lösungen können von der Suche ausgeschlossen werden (Verkleinerung des Suchraumes), wenn festgestellt wird, dass keine der potentiellen Lösungen dieses Astes zu einer Verbesserung der bereits vorliegenden Lösungen führen würde. Aufgrund des geschilderten Vorgehens benötigen Branch-and-Bound-Verfahren, aber auch andere exakte Verfahren, ein sehr hohes Maß an Rechenleistung und eignen sich daher nicht für die Lösung praktischer Problemgrößen, da sie größere

¹²⁴ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 541, Eiselt, H./ Sandblom, C.-L. (2000), S. 65 ff. und 205 ff. sowie Toth, P./ Vigo, D. (1998), S. 5 ff.

¹²⁵ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 6.

Problemstellungen nicht mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand lösen können. Aus diesem Grund werden exakte Verfahren im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft.¹²⁶

Die **heuristischen Verfahren** unterteilen sich in Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren.¹²⁷ Bei den Eröffnungsverfahren kann ferner eine Differenzierung in einstufige, auch simultane Verfahren genannt, und mehrstufige Verfahren, die auch als sukzessive Verfahren bezeichnet werden, erfolgen.¹²⁸ Diese Unterscheidung resultiert aus den zwei zu lösenden Grundproblemen der Tourenplanung, dem Zuordnungs- bzw. Gruppierungsproblem und dem Routing- bzw. Reihenfolgeproblem (vgl. Kapitel 2.3). Erfolgt die Lösung der zwei Teilprobleme der Tourenplanung gleichzeitig, wird von einstufigen bzw. simultanen Verfahren gesprochen. Je nachdem ob die Touren strikt nacheinander gebildet werden, d. h. die Konstruktion von Tour T_{i+1} erfolgt erst nach vollständiger Bildung der Tour T_i , oder ob im Planungsschritt die Möglichkeit besteht, beim Hinzufügen eines weiteren Kunden aus mehreren Touren auszuwählen, findet innerhalb der einstufigen Verfahren die Unterscheidung in sequentielle und parallele Algorithmen statt. Werden die Teilprobleme der Tourenplanung nacheinander gelöst, handelt es sich um mehrstufige bzw. sukzessive Verfahren. Bei dieser Gruppe ist in Abhängigkeit von der Reihenfolge, in der die Betrachtung der Teilprobleme stattfindet, eine Differenzierung nach route first - cluster second - und cluster first - route second - Verfahren möglich.

Bei den route first - cluster second - Algorithmen wird im ersten Schritt durch Lösen eines Traveling Salesman Problems eine "giant route" bestimmt, die die Bedienreihenfolge der Kunden festlegt. Im zweiten Schritt erfolgt erst die Beachtung der Kapazitäts- und/oder Zeitrestriktionen, anhand derer dann eine Aufspaltung der "giant route" in praktikable kleinere Touren stattfindet. Gegebenenfalls kann eine Nachoptimierung dieser Touren vorgenommen werden.¹²⁹

Die cluster first - route second - Algorithmen teilen im ersten Schritt die Menge aller Kunden unter Berücksichtigung der Kapazitäts- und/oder Zeitrestriktionen in disjunkte Teilmengen,

¹²⁶ Für detaillierte Ausführungen zu exakten Verfahren, speziell Branch-and-Bound, sei auf Domschke, W. (1997), S. 6 ff., Edelbüttel, J. (1997), 25 ff., Hamdy, T. (2003), S. 390 ff., Papadimitriou, C./ Steiglitz, J. (1982), S. 433 ff. und auf Toth, P./ Vigo, D. (2002), S. 29 ff. verwiesen. BLASUM befasst sich insbesondere mit dem Branch & Cut Verfahren zur exakten Lösung des kapazitierten Vehicle Routing Problems. Vgl. Blasum, U. (2000), S. 80 ff. Überblicke zu exakten Verfahren enthalten zudem Laporte, G./ Nobert, Y. (1987), S. 147 ff. und Laporte, G. (1992), S. 345 ff.

¹²⁷ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 235 f., Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59 ff., Gietz, M. (1994), S. 26 und Vahrenkamp, R. (2003), S. 241.

¹²⁸ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 234 f. und Gietz, M. (1994), S. 26.

¹²⁹ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 235.

die die Touren darstellen. Für die Kundenmenge je Tour wird im zweiten Schritt durch Lösung eines Traveling Salesman Problems die Reihenfolge der Kunden in der Tour bestimmt.

Verbesserungsverfahren versuchen Ergebnisse von Eröffnungsverfahren zu verbessern, indem sie

- durch Veränderung der Reihenfolge der Kunden innerhalb einer Tour oder
- durch veränderte Zuordnung von Kunden zu Touren, bei der Kunden oder Teiltouren zwischen benachbarten Touren getauscht werden,

neue Lösungen generieren.¹³⁰ Bei der zweiten Gruppe von Verfahren, die die Zuordnung der Kunden zu den Touren verändern, kann die Verschiebung eines Kunden von einer in eine andere Tour erfolgen oder zwei Kunden aus zwei verschiedenen Touren werden gegeneinander ausgetauscht oder der wechselseitige Tausch von zwei Teilstücken mit mehreren Kunden aus zwei verschiedenen Touren findet statt.

Bei klassischen Verbesserungsverfahren werden Tausche von Knoten (Kunden) innerhalb einer Tour oder zwischen verschiedenen Touren erreicht, indem das Ersetzen von Kanten der Ausgangslösung durch neue Kanten, die bisher nicht in der Lösung enthalten waren, erfolgt.¹³¹ Dabei werden die Tausche solange durchgeführt, wie dadurch eine Verbesserung des Zielfunktionswertes stattfindet.¹³² Das heißt, wird in einem Iterationsschritt kein Tausch mehr gefunden, der zu einer Verbesserung führt, bzw. würde durch den bestmöglichen Tausch der Zielfunktionswert wieder ansteigen, brechen diese Verfahren ab. Infolgedessen kann es dazu kommen, dass diese Verfahren nur ein lokales Optimum erreichen und das globale Optimum verfehlen. Diesen Nachteil versuchen die in jüngster Zeit vielfach in der Literatur diskutierten und bereits erfolgreich angewendeten heuristischen Metastrategien, wie z. B. Tabu Search¹³³, zu verbessern, indem sie vorübergehend auch Verschlechterungen des Zielfunktionswertes zulassen. Die Qualität der Lösung durch Anwendung der Metaheuristiken ist gewöhnlich höher, allerdings steigt damit auch die benötigte Rechenzeit.

Neben den bereits vorgenommenen Einteilungen der Heuristiken in verschiedene Arten teilen LAPORTE et al. Heuristiken für das Tourenplanungsproblem nach deren Entstehungs-

¹³⁰ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 543 und Gietz, M. (1994), S. 93. Verbesserungsverfahren, die sich nur auf eine einzelne Tour beziehen, werden auch als Intra-Tour-Verfahren und jene, die Austauschoperationen zwischen mehreren Touren zum Gegenstand haben, auch als Inter-Tour-Verfahren bezeichnet.

¹³¹ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-58.

¹³² Vgl. hierzu auch Kapitel 2.7.2.

¹³³ Tabu Search ist die momentan beste Heuristik für das Tourenplanungsproblem und wird daraufhin in der Literatur am meisten diskutiert. Tabu Search wurde Mitte der achtziger Jahre von GLOVER eingeführt. Vgl. Glover, F. (1986), S. 533 ff. Vgl. zu Tabu Search auch Glover, F./ Laguna, M. (1997) und Reeves, C. (1993), S. 70 ff. Vgl. ferner zu Metaheuristiken für das Tourenplanungsproblem z. B. Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 516 ff., Domschke, W. (1997), S. 28 ff. und Golden, B. et al. (1998), S. 33 ff.

zeitpunkt in zwei Hauptklassen, zum einen die klassischen Heuristiken, welche von 1960 bis 1990 entwickelt wurden, und zum anderen Metaheuristiken, die in den letzten 10 Jahren verstärkt in den Blickpunkt gerückt sind.¹³⁴ Die meisten heutzutage genutzten Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren gehören zu den klassischen Heuristiken. Diese ermöglichen unter Ausführung bestimmter "Vorgehensregeln zur Lösungsfindung oder -verbesserung, die hinsichtlich des angestrebten Zieles und unter Berücksichtigung der Problemstruktur als sinnvoll, zweckmäßig und erfolgversprechend erscheinen"¹³⁵, nur eine relativ begrenzte Erforschung des zulässigen Lösungsraumes. Allerdings ermitteln sie trotz der verhältnismäßig geringen bis moderaten Rechenzeiten für die Praxis gute Ergebnisse. Darüber hinaus können die meisten von ihnen einfach an die vielfältigen Restriktionen, die in der realen Umwelt auftreten, angepasst werden. Deshalb werden nach wie vor immer noch weitverbreitet die klassischen Heuristiken in kommerzieller Tourenplanungssoftware verwendet. Bei der Verwendung von Metaheuristiken besteht hingegen ein relativ großer Anpassungsaufwand an das genaue Problem und es ist eine genaue Justierung der Verfahrensparameter erforderlich.¹³⁶ Ferner gilt es zu beachten, dass Metaheuristiken trotz immer schnellerer Computerleistungen Lösungen im Minutenbereich bestimmen.¹³⁷ Im Gegensatz dazu generieren klassische Eröffnungsverfahren eine Lösung innerhalb weniger Sekunden oder sogar in Sekundenbruchteilen.

Im Folgenden werden einige der bekanntesten heuristischen Lösungsverfahren vorgestellt. Die hier beschriebenen Heuristiken sind das Savings-Verfahren, der Sweep-Algorithmus und die Einfüge-Heuristik. Besonders das Savings-Verfahren wird ausführlich behandelt, da es im weiteren Verlauf der Arbeit eine große Rolle spielt.

Das **Savings-Verfahren**¹³⁸, das ursprünglich von CLARK und WRIGHT entwickelt wurde, ist ein häufig genutztes einstufiges Verfahren. Das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem werden bei ihm simultan gelöst. Nach der Bestimmung einer Ausgangslösung, bei der jeder Kunde in einer am Depot beginnenden und endenden Pendeltour bedient wird, erfolgt die Zusammenfassung von Kunden, d. h. die Verknüpfung von zwei Touren, auf Basis von Ersparniswerten, den sogenannten "Savings". Der Berechnung der Savingswerte liegt der Vergleich von separater Bedienung von zwei Kunden i und j über zwei Pendeltouren auf der

¹³⁴ Vgl. Laporte et al. (2000), S. 286.

¹³⁵ Domschke, W. (1997), S. 21.

¹³⁶ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59.

¹³⁷ Vgl. dazu die Ergebnisse der empirischen Tests von Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 519 und Laporte, G. et al. (2000), S. 297. Diese Tests zeigen, dass die Rechenzeit durchaus mehrere Minuten bis sogar deutlich mehr als eine Stunde in Anspruch nehmen kann.

¹³⁸ Vgl. Clark, G./ Wright, J.W. (1964), S. 568 ff., Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 514 ff., Hillert, F. (1992), S. 74 ff., Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 471 ff. und Vahrenkamp, R. (1998), S. 191 ff.

einen Seite und kombinierter Bedienung von zwei Kunden i und j innerhalb einer Tour auf der anderen Seite zugrunde (vgl. Abb. 2-6).

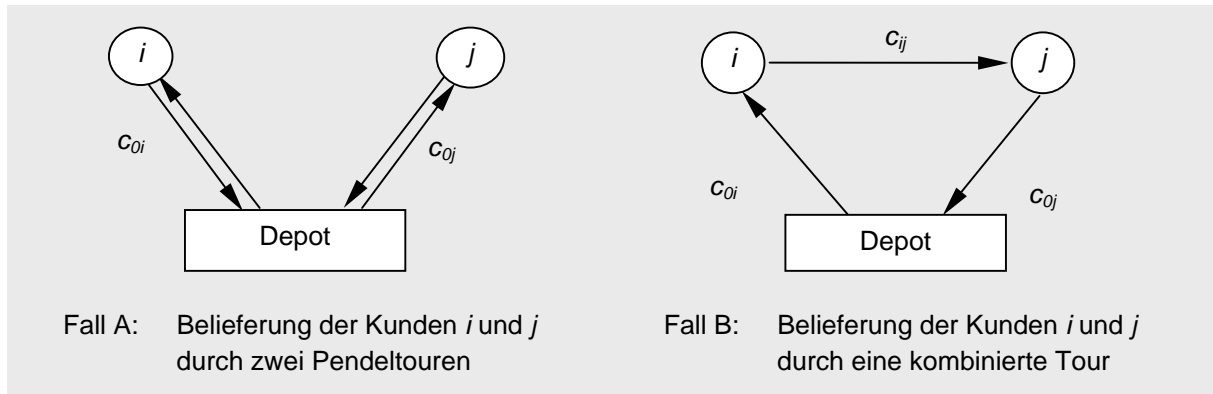


Abb. 2-6: Idee der Savingswertbestimmung

Die Differenz der Tourlängen aus Fall A und Fall B der Abbildung 2-6 ergibt den Savingswert

$$s_{ij}: \quad s_{ij} = 2c_{0i} + 2c_{0j} - (c_{0i} + c_{0j} + c_{ij})$$

$$= c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$$

Beginnend mit dem größten Savingswert, da er die größte Ersparnis bringt, werden in jeder Iteration unter Beachtung der geltenden Restriktionen wie max. Fahrzeugkapazität jeweils diejenigen zwei Touren miteinander verknüpft, die die größte Einsparung liefern. Sind alle möglichen Savingswerte s_{ij} untersucht worden, bricht das Verfahren ab. Im Folgenden findet sich eine Algorithmusübersicht mit den Schritten des Savings-Verfahrens:

Start: Bilde Pendeltouren $T_i = [0, i, 0]$ für $(i = 1, \dots, n)$ mit Länge $c(T_i) = 2c_{0i}$ und benötigtem Bedarf $q(T_i) = b_i$.
 Berechne Savings $s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$ ($i < j$).
 Sortiere Savings absteigend in einer Liste.

Iteration: Bestimme maximalen Savingswert $s_{i^*j^*}$ aus der Liste der Savingswerte (Falls zwei Savingswerte identisch sind, wähle denjenigen, bei dem die Kunden die kleinere Entfernung zueinander haben.).

Im Falle der Erfüllung der folgenden Bedingungen

- 1) i^* ist Randknoten einer Tour T_1 , j^* ist Randknoten einer Tour T_2 ($T_1 \neq T_2$).
- 2) Der Gesamtbedarf aller Kunden in T_1 und T_2 ist kleiner oder gleich der Kapazität Q : $q(T_1) + q(T_2) \leq Q$

verbinde die beiden Touren T_1 und T_2 zur kombinierten Tour $T_1 \times T_2$ mit

$$q(T_1 \times T_2) = q(T_1) + q(T_2)$$

$$c(T_1 \times T_2) = c(T_1) + c(T_2) - s_{i^*j^*}.$$

Eliminiere $s_{i^*j^*}$ aus der Liste der Savingswerte.

Abbruch: Liste der Savingswerte = \emptyset

Das in dieser Form dargestellte Savings-Verfahren gehört zur Gruppe der parallelen Eröffnungsverfahren. Den Savings-Algorithmus gibt es in vielen Varianten.¹³⁹ Eine sequentielle Variante erweitert in jeder Iteration nur die jeweils betrachtete Tour am Anfang oder Ende, d. h. der gleichzeitige Aufbau mehrerer Touren wird für die sequentielle Variante unterlassen. Ist die Erweiterung der aktuell betrachteten Tour nicht mehr möglich, erfolgt die Eröffnung einer neuen Tour. PAESSENS hingegen befasst sich beispielsweise mit der Parametrisierung der Savingsformel.¹⁴⁰ Er schlug als veränderte Savingsformel vor: $s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - g \cdot c_{ij} + f \cdot |c_{0i} - c_{0j}|$, mit $0 < g \leq 3$ und $0 \leq f \leq 1$. Der Einfluss der Parameter kann wie folgt beschrieben werden:

- $g < 1$: Die bevorzugte Kombination von Kunden, die nahe beieinanderliegender, verliert mit sinkendem g an Gewicht.
- $g > 1$: Je größer g wird, desto stärker werden geringe Abstände zwischen zwei Kunden berücksichtigt.
- $f < 0$: Je unterschiedlicher zwei Kunden vom Depot entfernt sind, desto geringer ist der Savingswert.
- $f > 0$: Je unterschiedlicher zwei Kunden vom Depot entfernt sind, desto größer ist der Savingswert.

($g=1$ und $f=0$ stellen die klassische Variante der Savingsformel dar.)

Aufgrund der kurzen Rechenzeiten des Savingsverfahrens können mehrere Parameterkombinationen von g und f getestet und die für das vorliegende praktische Probleme beste Kombination ausgewählt werden.

Das wohl bekannteste zweistufige Eröffnungsverfahren ist der **Sweep-Algorithmus**, der sich sehr stark an der geographischen Anordnung der Kunden orientiert. In der Literatur finden sich einige Varianten und Modifikation zu diesem Verfahren.¹⁴¹ Die Grundversion des Sweep-Algorithmus wurde von GILLET und MILLER entwickelt.¹⁴² Ausgehend von einem Koordinatensystem, dessen Ursprung mit dem Standort des Depots übereinstimmt, erfolgt die Sortierung der Kunden nach aufsteigenden Polarwinkeln, zu dessen Bestimmung die Standortkoordinaten der Kunden verwendet werden. Anhand der Reihenfolge der sortierten Liste findet im ersten Schritt die Zusammenfassung der Kunden zu Clustern (Touren) statt, wobei ein Cluster abgeschlossen ist, wenn die Aufnahme eines weiteren Kunden die Kapazitäts-

¹³⁹ Vgl. Altinkemer, K./ Gavish, B. (1991), S. 456 ff., Paessens, H. (1988), S. 336 ff., Domschke, W. (1997), S. 247 und Gietz, M. (1994), S. 44.

¹⁴⁰ Vgl. Paessens, H. (1987), S. 34 ff. und Paessens, H. (1988), S. 339.

¹⁴¹ Vgl. hierzu bspw. Domschke, W. (1997), S. 239 ff.

¹⁴² Vgl. Gillet, B.E. und Miller, L.R. (1974), S. 340 ff.

und/oder Zeitrestriktionen verletzen würde. Im zweiten Schritt erfolgt die Bestimmung der Reihenfolge innerhalb der Tour für die Kunden je Cluster durch Lösung eines Traveling Salesman Problems. Das geschilderte Vorgehen zur Generierung eines Tourenplans findet n -mal statt, da jeder Knoten einmal Startknoten für die Sortierung nach aufsteigenden Polarwinkeln ist. Somit werden n Tourenpläne bestimmt, aus denen derjenige mit der geringsten Gesamtdistanz auszuwählen ist. Nach FLEISCHMANN/GIETZ und DOMSCHKE gehört der Sweep-Algorithmus zur Gruppe der route first - cluster second - Verfahren, da anhand der Sortierung der Kunden nach den Polarwinkeln zuerst eine Route bestimmt wird und diese in einem zweiten Schritt in Touren durch Clusterbestimmung aufgeteilt wird.¹⁴³

Die **sukzessive Einbeziehung**¹⁴⁴ von Kunden in einen Tourenplan als Verfahren der Tourenplanung stammt ursprünglich aus dem Bereich der TSP-Methoden. Bei diesem Verfahren wird immer nur eine Tour betrachtet. Die Initialisierung der ersten Tour entsteht, indem die Auswahl des am weitesten vom Depot entfernten Knoten erfolgt. Danach wird für jeden noch nicht in den Tourenplan aufgenommenen Kunden die beste Einfügeposition unter allen möglichen Einfügepositionen bezüglich der aktuellen Tour bestimmt. Es wird der Kunde mit den minimalsten Einfügekosten ausgewählt und in die Tour bzw. den Tourenplan integriert. Die Einfügekosten (bzw. -länge) errechnen sich aus $c_{ik} + c_{jk} - c_{ij}$ (i und j sind zwei benachbarte Kunden innerhalb der Tour und k der einzufügende Kunde.). Bei der Bestimmung der Einfügeposition ist zu beachten, dass keine Restriktionen verletzt werden. Ist es nicht mehr möglich weitere Kunden in eine Tour aufzunehmen, z. B. da infolgedessen die Kapazität überschritten werden würde, erfolgt die Initialisierung einer weiteren Tour, indem erneut unter allen unverplanten Kunden derjenige ausgewählt wird, der am weitesten vom Depot entfernt ist. Sind alle Kunden verplant, bricht das Verfahren ab und der fertige Tourenplan liegt vor. Die sukzessive Einbeziehung bildet die Touren sequentiell.

FLEISCHMANN/ GIETZ geben an, dass das Savingsverfahren und die Methode der sukzessiven Einbeziehung bei durchgeführten Tests akzeptable Ergebnisse erzielten, während die Güte des Sweep-Algorithmus stark von der geographischen Verteilung der Kunden und der Lage des Depots abhängt.¹⁴⁵ Nach FLEISCHMANN/ GIETZ sind die Elemente des Savings- und des Einbeziehungsalgorithmus Bestandteile der meisten Tourenplanungssoftwareprogramme, während dem Sweep-Verfahren heute keine Bedeutung mehr zukommt. Auch ABERLE

¹⁴³ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-57 und Domschke, W. (1997), S. 235.

¹⁴⁴ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-57, Vogt, M. (1998), S. 65 ff., Weissermel, M. (1999), S. 43 und Vahrenkamp, R. (2003), S. 208 ff.

¹⁴⁵ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-58, Domschke, W. (1997), S. 117 ff., Vahrenkamp, R. (2003), S. 217 f. und Vogt, M. (1998), S. 67 f.

gibt an, dass in praktischen Anwendungen das Savingsverfahren i. d. R. dem Sweep-Algorithmus gegenüber präferiert wird.¹⁴⁶

Das Grundprinzip aller Verbesserungsverfahren ist durch Tauschoperationen eine gegebene Lösung zu verbessern, indem Kanten der Ausgangslösung durch neue Kanten ersetzt werden. Das 2-opt- und das 3-opt-Verfahren, welche bereits in Kapitel 2.7.2 beschrieben wurden, gehören zur ersten Gruppe von Verbesserungsverfahren, die nur die Reihenfolge der Knoten (Kunden) innerhalb einer Tour verändern. Diese werden auch als Intra-Tour-Verfahren bezeichnet. Demgegenüber führen Inter-Tour-Verbesserungsverfahren Tauschoperationen zwischen mehreren Touren des Tourenplanes durch.¹⁴⁷ Infolgedessen können sich Zuordnungen von Kunden zu Touren ändern und dadurch sogar Toureinsparungen resultieren. Inter-Tour-Verfahren bieten aufgrund der größeren Anzahl an Kunden, die gemeinsam betrachtet werden, mehr Austauschmöglichkeiten als Intra-Tour-Verfahren. Allerdings ist zu beachten, dass dadurch Inter-Tour-Verfahren aufwendiger in der Implementierung sind und eine längere Rechenzeit benötigen.¹⁴⁸

In der Abbildung 2-7 sind drei Austauschmöglichkeiten zu sehen, die sich auf zwei verschiedene Touren beziehen. SAVELSBERGH bezeichnet diese drei Varianten als Cross, Relocate und Exchange.¹⁴⁹ Bei einem Cross-Tausch werden die Endabschnitte zweier Touren vertauscht.¹⁵⁰ Der Relocate-Tausch entfernt einen Kunden i aus seiner aktuellen Tour und fügt ihn in eine andere Tour an geeigneter Position ein. Eine Exchange-Operation tauscht die Plätze zweier Kunden i und j aus zwei verschiedenen Touren gegeneinander aus.

Ebenfalls zu den Verbesserungsverfahren zählen heuristische Metastrategien. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sie sich von den klassischen Verbesserungsverfahren vor allem dadurch, dass sie vorübergehend auch Verschlechterungen bei der Güte der gefundenen Lösung zulassen, um lokale Optima zu überwinden. Zu den bedeutendsten Metaheuristiken gehören Tabu Search, Simulated Annealing, Genetische Algorithmen, Ameisensysteme und Neuronale Netze.¹⁵¹ Nach Einschätzungen von CORDEAU et al. und FLEISCHMANN/GIETZ

¹⁴⁶ Vgl. Aberle, G. (2003), S. 543.

¹⁴⁷ Vgl. Matthäus, F. (1978), S. 158 ff.

¹⁴⁸ Vgl. Gietz, M. (1994), S. 100.

¹⁴⁹ Vgl. Savelsbergh, M. W. P. (1991), S. 10 ff. Neben SAVELSBERGH haben sich auch DOMSCHKE, WREN/HOLLIDAY, WATERS sowie FAHRION/WREDE mit Inter-Tour-Verfahren auseinandergesetzt. Vgl. Domschke, W. (1997), S. 249 f., Wren, A./ Holiday, A. (1972), S. 333 ff., Waters, C. D. J. (1987), S. 833 ff. und Fahrion, R./ Wrede, M. (1990), S. 821 ff.

¹⁵⁰ Vgl. van Breedam, A. (1996), S. 1 ff.

¹⁵¹ Vgl. bspw. Osman, I. H. (1993), S. 421 ff., van Breedam, A. (1996), S. 1 ff., Bullnheimer, B. et al. (1999), S. 561 ff., Homberger, J. (2000), S. 1 ff., Feldmann, M. (1999), S. 1 ff. und Gendreau, M. et al. (2002), S. 129 ff.

ragen vor allem die Tabu Search Ansätze unter diesen Verfahren heraus.¹⁵² Weiterhin geben FLEISCHMANN/GIETZ an, dass Simulated Annealing gute Ergebnisse liefert, jedoch sich nicht besonders robust bei verschiedenen Problemstellungen verhält. Vielversprechende Lösungen zeigen Ameisensysteme und Genetische Algorithmen, wobei diese Ansätze noch stärker erforscht werden müssen. Neuronale Netze sind nach FLEISCHMANN/GIETZ eher ungeeignet für Tourenplanungsprobleme. Im Folgenden werden kurz die prinzipielle Vorgehensweise von Tabu Search, Simulated Annealing und Genetischer Algorithmen erklärt.

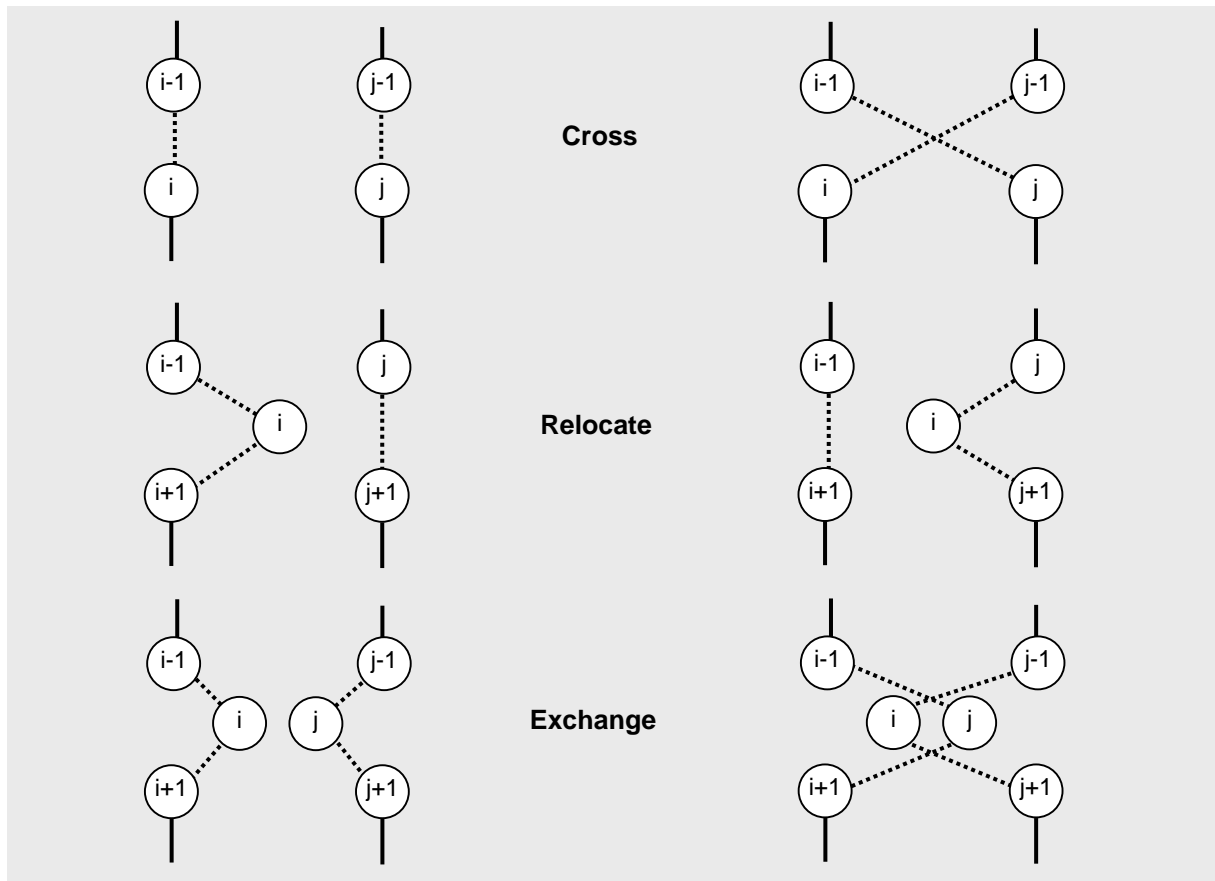


Abb. 2-7: Tauschvarianten bei Inter-Tour-Verfahren

Das Konzept des Tabu Search wurde von GLOVER (1986) entwickelt.¹⁵³ Es startet wie klassische Verbesserungsverfahren mit einer zulässigen Lösung und untersucht in jeder Iteration¹⁵⁴ alle zulässigen Nachbarn¹⁵⁵ dieser Lösung. D. h., in jeder Iteration wird ein Zug ausgewählt, der zur größten Verbesserung, oder, falls keine Verbesserung möglich ist, zur geringsten Verschlechterung des Zielfunktionswertes führt. Eine Verschlechterung wird allerdings

¹⁵² Vgl. Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 517 und Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-59.

¹⁵³ Vgl. Glover, F. (1986), S. 533 ff.

¹⁵⁴ In einer Iteration können bspw. Intra-Tour- oder Inter-Tour-Austauschschritte durchgeführt werden.

¹⁵⁵ Als *Nachbar* wird jede von einer Lösung x durch Ausführung eines Zuges erreichbare andere Lösung bezeichnet. Die *Nachbarschaft* ist die Menge aller Nachbarn der Lösung x . Vgl. Vogt, M. (1998), S. 76.

nur dann akzeptiert, wenn unter allen zulässigen Lösungen keine Verbesserung des Zielfunktionswertes realisiert werden kann. Zur Vermeidung „des Kreisens“ um ein lokales Optimum werden zuvor verlassene Lösungen, d. h. bestimmte Austauschschritte, für eine festgelegte Tabudauer (Anzahl an Iteration) gesperrt. Somit erfolgt die Auswahl des besten unter allen nicht verbotenen Zügen. Ein wichtiger Steuerungsparameter ist dementsprechend die Tabudauer. Die bisher beste erreichte Lösung wird solange gespeichert bis eine bessere Lösung gefunden wurde oder ein festgelegtes Abbruchkriterium erreicht wird. Als Abbruchkriterium für das Verfahren können bspw. eine vorher definierte maximale Anzahl durchzuführender Iterationen oder ein Rechenzeitlimit gelten.

Simulated Annealing¹⁵⁶ basiert auf der Simulierung des Abkühlungsprozesses (Annealing) zur Gewinnung von möglichst reinen Metallen aus flüssigem Metall. Es wurde in den achtziger Jahren erstmals für die diskrete Optimierung verwendet. Dieses Verbesserungsverfahren erzeugt, ausgehend von einer Startlösung, zufällige Züge, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angenommen werden. Mit Wahrscheinlichkeit 1 erfolgt die Annahme einer Zielfunktionswertverbesserung, während bei Zielfunktionswertverschlechterungen die Annahmewahrscheinlichkeit von Zügen mit dem Ausmaß der Verschlechterung sowie infolge eines im Verlauf des Verfahrens abnehmenden Temperaturparameters sinkt. Ferner ist ein entscheidender Parameter dieses Verfahrens der zuvor festgelegte Abkühlungsplan.¹⁵⁷ Bei sorgfältiger Wahl des Abkühlungsplanes können lokale Suboptima überwunden werden. Zudem verhindert er ein unendlich langsames Abkühlen, was nicht praktikabel wäre.

Genetische Algorithmen¹⁵⁸ sind anpassungsfähige Suchmethoden, die in Analogie zur genetischen Vererbungslehre vorgehen. Sie gehören daher zu den Evolutionären Algorithmen. Aus einer anfänglich zufällig bestimmten Anzahl von Lösungskandidaten (Individuen) erfolgt die Auswahl derjenigen Kandidaten (Individuen), die einem bestimmten Gütekriterium, am besten entsprechen. Die Bestimmung der Anfangspopulation an Individuen bzw. Lösungskandidaten wird als Initialisierung bezeichnet und die Auswahl der Individuen bzw. Lösungskandidaten als Selektion. Der folgende Schritt nennt sich Rekombination und Mutation. Bei der Rekombination werden die Eigenschaften der ausgewählten Individuen (Elter-Individuen) leicht verändert und miteinander kombiniert, um neue Kinder-Individuen zu erzeugen. Im Anschluss erfolgt mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit die Manipulation der Gene einzelner Individuen (Mutation). So entsteht durch Rekombination und Mutation eine neue Generation von Lösungskandidaten (neue Menge von Individuen), die möglichst bessere Lösungen

¹⁵⁶ Vgl. Osman, I. H. (1993), S. 421 ff.

¹⁵⁷ Vgl. Kuhn, H. (1992), S. 387 ff.

¹⁵⁸ Vgl. Holland, J. M. (1975), S. 1 ff. und Goldberg, D. E. (1989), S. 1 ff.

darstellen. Abschließend findet durch Wettbewerb die Bestimmung der Individuen der nächsten Generation statt. Ein Genetischer Algorithmus erzeugt iterativ solange neue Generationen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Ein solches Abbruchkriterium kann die maximale Anzahl an zu erzeugenden Generationen sein.

2.7.4 Beurteilungskriterien von heuristischen Verfahren

Für die Lösung eines Rundreise- bzw. Tourenplanungsproblems gibt es eine Vielzahl von Verfahren, von denen zuvor einige vorgestellt wurden. Ein Vergleich der Methoden, speziell heuristischer Verfahren, ist anhand verschiedener Beurteilungskriterien möglich. CORDEAU et al. nennen diesbezüglich die vier Attribute Lösungsgüte, Geschwindigkeit, Einfachheit und Flexibilität.¹⁵⁹

Die **Lösungsgüte** beschreibt die Qualität der erzielten Lösung, d. h. wie weit weicht das durch die Heuristik bestimmte Ergebnis vom Optimum ab. Dabei sollten sowohl die Lösungen im Mittel dicht am Optimum liegen als auch die Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung einer schlechten Lösung gering sein.

Unter **Geschwindigkeit** ist die Beurteilung der benötigten Rechenzeit zu verstehen. Dieses Kriterium wird stark von der vorliegenden Problemgröße und von der geforderten Lösungsgüte des Algorithmus determiniert.

Die **Einfachheit** gibt an, wie gut ein Anwender das Vorgehen des Algorithmus verstehen kann und wie einfach das Verfahren zu implementieren ist. Das Verstehen des Algorithmus trägt zu einer höheren Akzeptanz durch den Benutzer bei. Des Weiteren ist die Interpretation der erzielten Ergebnisse durch den Anwender besser möglich, wenn eine leicht verständliche Methode verwendet wird. Manuelle Eingriffe in die Planungsergebnisse können besser erfolgen. Ferner führt ein einfaches Verfahren oft zu einem wirtschaftlich vernünftigen Aufwand.

Das Kriterium **Flexibilität** eines Verfahrens sagt aus, ob die Methode sich gut an verschiedene Problemstellungen anpassen lässt oder nicht. Eine hohe Flexibilität ist demnach gegeben, wenn viele praxisrelevante Nebenbedingungen in den Algorithmus aufgenommen werden können bzw. dahingehend eine Erweiterung des Algorithmus möglich ist. In dieses Bewertungskriterium sollte auch einfließen, wie kompliziert derartige Erweiterungen des Verfahrens sind.

Neben den bereits genannten Attributen, die sich bei WIEDEY unter den Begriffen gute Ergebnisse, Einfachheit und Wirtschaftlichkeit wiederfinden, formuliert WIEDEY als Anforderungen an ein Tourenplanungsverfahren, dass mittlere bis große Probleme (50 bis 500 Kunden)

¹⁵⁹ Vgl. Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 513 f.

behandelt werden können und dass das Mitwirken eines Tourenplaners möglich ist.¹⁶⁰ Nach der Art der Bestimmung der Beurteilungskriterien kann eine Unterteilung in objektiv überprüfbare Eigenschaften (erforderlicher Rechenaufwand, Ein- und Ausgabezeiten, benötigter Speicherplatz, erzielte Streckensumme (Zielfunktionswert) sowie Lösungswahrscheinlichkeit) und in subjektiv abschätzbare Eigenschaften (einfache Handhabung, leicht verständliche Vorgehensweise bzw. Idee, Flexibilität bezüglich Erweiterung sowie Mitwirkung eines Tourenplaners) erfolgen.¹⁶¹

Die in dieser Arbeit vorgestellten Heuristiken sowohl zur Rundreiseplanung als auch zur Tourenplanung weisen eine hohe bis sehr hohe Geschwindigkeit und eine sehr gute Verständlichkeit auf. Je nach Quelle variieren die Angaben zur Lösungsgüte, so wird zum einen angegeben, dass z. B. das Savingsverfahren und die Methode der sukzessiven Einbeziehung bei durchgeführten Tests akzeptable Ergebnisse erzielten und zum anderen finden sich auch Quellen, in denen diesen Verfahren nur eine geringe Lösungsgüte beigemessen wird.¹⁶² Besonders das Savingsverfahren weist durch die Eigenschaften *sehr schnelle Lösungsgeschwindigkeit*, *leichte Implementierbarkeit* bzw. *sehr gute Verständlichkeit* und *hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Problemstellungen* eine sehr große Popularität auf.¹⁶³

Weil die dynamische Tourenplanung besonders kurze Rechenzeiten verlangt, um schnellstmöglich auf veränderte Situationen reagieren zu können, wurden das Savingsverfahrens und die sukzessive Einbeziehung, aufgrund ihrer besonderen Charakteristik, in dieser Arbeit für die Konzeption neuer Verfahren für die dynamische Tourenplanung als Grundlage benutzt.¹⁶⁴ Darüber hinaus erfolgte die Implementierung des für die dynamische Tourenplanung modifizierten Savingsverfahrens, um die praktische Anwendbarkeit zu demonstrieren. Zudem konnten numerische Tests durchgeführt werden. Der Kritikpunkt einer zu geringen Flexibilität bezüglich praxisrelevanter Nebenbedingungen wurde im Rahmen dieser Arbeit durch den Autor für diese Verfahren nicht festgestellt. Entsprechende Anpassungen des Savingsverfahrens und des Verfahrens sukzessive Einbeziehung für die dynamische Tourenplanung, wie z. B. zusätzliche Startpunkte für Touren, heterogener Fuhrpark usw., konnten umgesetzt werden. Um die Lösungsgüte zu erhöhen, erfolgt am Ende der Arbeit ein kurzer Ausblick zum Einsatz von klassischen Verbesserungsverfahren und Metaheuristiken.

¹⁶⁰ Vgl. Wiedey, H. (1982), S. 94.

¹⁶¹ Vgl. Wiedey, H. (1982), S. 95 f.

¹⁶² Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A 3-58 und Cordeau, J.-F. et al. (2002), S. 520.

¹⁶³ Vgl. Gietz, M. (1994), S. 45. Auch GIETZ bestätigt, dass das Savingsverfahren den Kern der meisten kommerziellen Tourenplanungssysteme darstellt. Vgl. Gietz, M. (1994), S. 45.

¹⁶⁴ Vgl. Kapitel 4.3.2 und 4.3.3.

3 Grundlagen der dynamischen Tourenplanung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Einordnung der Tourenplanung in die Logistik und die Analyse der Bedeutung der Tourenplanung für den Güterverkehr erfolgte sowie die Tourenplanung im allgemeinen Verständnis erklärt, Arten von Tourenplanungsproblemen genannt und ein Modell bzw. Verfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemstellungen präsentiert wurden, befasst sich dieses Kapitel speziell mit der dynamischen Tourenplanung. Die dynamische Tourenplanung ist eine besondere Form der Tourenplanung, bei der die Variation der Inputdaten für die Planung und die daraus resultierende wiederholte Durchführung der Planung im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Je nachdem wie stark der Input nach der ersten erfolgten Planung variiert, werden neue oder weiterentwickelte Verfahren vorgeschlagen, um diese Besonderheit beachten zu können. Die in Kapitel vier vorgestellten durch den Autor neu entwickelten Verfahren berücksichtigen nur die Anzahl der zu bedienenden Kunden als dynamischen Inputfaktor. Zwecks einer möglichst ganzheitlichen Betrachtung der dynamischen Tourenplanung sind die in diesem Kapitel folgenden Erörterungen zur dynamischen Tourenplanung genereller Natur und können sich daher auf die Dynamik bezüglich aller Inputfaktoren beziehen.

Der Aufbau dieses Kapitels ist wie folgt: Kapitel 3.1 enthält eine vergleichende Definition zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung, bei der die wesentlichen Unterschiede aufgezeigt werden. Ein Literaturüberblick bezüglich der wichtigsten Werke zur dynamischen Tourenplanung ist Gegenstand von Kapitel 3.2. In Kapitel 3.3 erfolgt die Beschreibung von Anwendungsgebieten der dynamischen Tourenplanung. Ein Abriss zu Lösungsverfahren und -konzepten zur dynamischen Rundreise- und Tourenplanung wird in Kapitel 3.4 gegeben. Einige der vorgestellten Verfahren können sowohl für Probleme der dynamischen Tourenplanung als auch der dynamischen Rundreisepaltung eingesetzt werden. Ferner finden dynamische Rundreiseverfahren auch Anwendung zur Lösung von Subproblemen im dynamischen Tourenplanungsprozess. Kapitel 3.5 behandelt den Grad der Dynamik, eine bedeutende Kennzahl zur Charakterisierung dynamischer Tourenplanungsprobleme. Abschließend werden in Kapitel 3.6 telematische Komponenten vorgestellt, die bei der Durchführung einer dynamischen Tourenplanung zum Einsatz kommen sollten, um eine nachhaltige Umsetzung eines dynamischen Dispositionssystems zu unterstützen.

3.1 Definition statischer und dynamischer Tourenplanung

Tourenplanungsprobleme können in das Standardproblem und spezielle Probleme, bei denen unterschiedliche praxisrelevante Nebenbedingungen Berücksichtigung finden (z. B. das Tourenplanungsproblem mit Kundenzeitfenstern¹⁶⁵ oder das Tourenplanungsproblem mit heterogenem Fuhrpark¹⁶⁶), differenziert werden.¹⁶⁷ Im Folgenden soll eine Differenzierung zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung erfolgen. Dabei liegt der Focus auf der Art und Weise, wie die Daten für die Planung zugänglich werden und wie oft daraus resultierend eine Planung bzw. Modifizierung der Tourenplanungsergebnisse durchgeführt wird. Bei der **statischen Tourenplanung** sind alle relevanten Planungsinformationen (z. B. geographische Lage, Servicezeit, Auftragsmenge der Kunden) vor Beginn der Tourenplanung bekannt und zugänglich. Die für die Tour relevanten Informationen bleiben nach dem Zeitpunkt der Tourenplanung konstant. Die Fahrzeit zwischen den Kunden ist ebenfalls im Vorhinein gegeben. Im Rahmen der statischen Tourenplanung wird somit vollkommene Sicherheit unterstellt. Bei der **dynamischen Tourenplanung** handelt es sich um ein weitaus komplexeres Problem. Im Unterschied zur statischen Tourenplanung liegen zum Start des Planungsprozesses nicht alle für die Planung der Touren notwendigen Informationen vor, d. h. die Unsicherheit der Daten ist zu beachten. Bei der dynamischen Tourenplanung variiert der Input parallel zur Ausführung der Touren. Der Planer aktualisiert daher ständig die Planungsergebnisse vorheriger Planungsschritte unter Einbeziehung der neuen oder veränderten Informationen. Im Gegensatz zur statischen Tourenplanung, bei der die Touren nur einmal bestimmt werden und eine spätere Anpassung nicht stattfindet, erfolgt bei der dynamischen Tourenplanung eine kontinuierliche Modifizierung bzw. Optimierung der Touren, also eine mehrmalige Planung.

Zusammenfassend ergibt sich folgende Charakterisierung zur Unterscheidung von statischer und dynamischer Tourenplanung, die im weiteren Verlauf der Arbeit zugrunde liegen soll:¹⁶⁸

Statische Tourenplanung

- alle Informationen/Daten sind vor dem Planungsprozess bekannt
- die Information/Daten ändern sich nicht
- einmalige Planung

¹⁶⁵ Vgl. Fleischmann, B. (1998), S. 296 f.

¹⁶⁶ Vgl. Fleischmann, B. (1998), S. 297 ff.

¹⁶⁷ Vgl. Kapitel 2.3.

¹⁶⁸ In Anlehnung an Larsen, A. (2001), S. 4 f.

Dynamische Tourenplanung

- nicht alle Informationen sind vor dem Planungsprozess bekannt
- die Informationen können sich ändern nachdem die Touren geplant wurden
- mehrmalige Planung, aufgrund des sich ändernden Inputs¹⁶⁹

Arten von Inputdaten, die bei einer dynamischen Tourenplanung im Idealfall einer Berücksichtigung bedürfen, sind neue Kunden, Änderung der Auftragsmenge, Variation der Standzeit beim Kunden, Änderung der Anlieferzeitfenster, Schwankungen bei den eigenen Kapazitäten und aktuelle Verkehrsverhältnisse, welche die Fahrzeiten determinieren:

- Kunden: Der wohl bekannteste Input, der dynamisch sein kann, sind die Kunden selber. Viele Autoren definieren dynamische Tourenplanung daher anhand der Kunden. Nach VOGT liegt dynamische Tourenplanung dann vor, wenn zum Planungszeitpunkt noch nicht alle Kunden vorliegen, sondern eine Teilmenge der Kunden bzw. Aufträge erst bei der Ausführung der Fahrten (Touren) bekannt wird.¹⁷⁰
- Auftragsmenge: Neben der Unbestimmtheit der Kunden kann es auch Fälle geben, bei denen der Kunde schon bekannt ist, jedoch noch nicht die abzuholende oder auszuliefernde Menge. Diese Information wird erst beim Eintreffen am Kundenstandort zugänglich. Beispiele für die Unbestimmtheit der Menge sind die Auslieferung von Brennstoffen (Heizölverkauf) oder Haustürverkäufe von Tiefkühlware.
- Standzeit: Auch die Standzeiten beim Kunden, vor allem durch vom Kunden verursachte Ereignisse, sind im Vorhinein noch nicht sicher bekannt. Zum Beispiel kann die Laderampe beim Kunden durch einen anderen Lieferanten oder Dienstleister noch blockiert sein.
- Kundenzeitfenster: Der Kunde kann das Anlieferzeitfenster verschieben, es verkürzen oder bei Vorliegen mehrerer Anlieferzeitfenster kurzfristig auf eines reduzieren.
- Kapazitäten: Auch die für die Tourenplanung zur Verfügung stehenden Kapazitäten können schwanken. Beispiele wären ein plötzlicher Defekt an einem Fahrzeug oder Krankheit eines Mitarbeiters.
- Fahrzeiten: Fahrzeiten können ebenfalls dynamisch sein. Dabei sind nicht nur die tageszeitabhängigen Fahrzeiten, die sich aus im Tagesablauf regelmäßigen Schwankungen ergeben und somit deterministisch sind, gemeint, sondern auch plötzlich, un-

¹⁶⁹ Da sich ein Tourenplan aufgrund des operativen Charakters der Tourenplanung i. d. R. auf nur einen Tag bezieht, kann von dynamischer Tourenplanung dementsprechend nur bei einer mehrmals täglichen Planung bzw. Modifikation der Tourenplanungsergebnisse gesprochen werden.

¹⁷⁰ Vgl. Vogt, M. (1998), S. 45.

erwartet bzw. zufällig auftretende Veränderungen der Fahrzeit, hervorgerufen durch Unfälle oder Verkehrsstauungen.

Zwischen statischen und dynamischen Tourenplanungsproblemen gibt es einige elementare Unterschiede, deren Darstellung im Folgenden kurz in Form von Thesen erfolgt. Die Formulierung der Thesen erfolgt in Anlehnung an PSARAFTIS, der als erster Besonderheiten von dynamischen Tourenplanungsproblemen herausstellte, welche des Öfteren auch von anderen Autoren aufgegriffen werden:¹⁷¹

- Zeit als elementare planungsbeeinflussende Komponente:

Liegt eine dynamische Problemstellung vor, ist die Ausprägung von Variablen zu einer bestimmten Zeit zu beachten oder sogar die Zeit selber von Interesse. So muss der Disponent einer dynamischen Planungssituation mehrmals die Position seiner Fahrzeuge bestimmen, die Ankunftszeit eines neuen Kunden speichern oder Änderungen der Daten registrieren. Ferner lässt die zu berücksichtigende zeitliche Komponente bereits erzielte Planungsergebnisse suboptimal werden.

- Open-end Problem:

Da bei der statischen Tourenplanung alle Daten bekannt sind, kann berechnet werden, wann die Fahrzeuge am Depot starten und wann sie wieder am Depot eintreffen. Im Gegensatz dazu ist bei der dynamischen Tourenplanung kein Ende gegeben. Entweder handelt es sich um einen nicht endenden kontinuierlichen Prozess, oder die dynamische Disposition ist durch das Ende des Arbeitstages des eigenen Unternehmens begrenzt. Da bei der dynamischen Tourenplanung eine mehrmalige Planung erfolgt, spricht LARSEN bei einem dynamischen Problem auch davon, dass nur Ketten von Kunden oder der Pfad, auf dem sich die Fahrzeuge bewegen, geplant werden, im Gegensatz zum statischen Problem, bei dem die Berechnung der kompletten Tour erfolgt, die am Depot beginnt und endet.¹⁷² Aus der Aufgliederung des dynamischen Gesamtproblems in Teil- oder Subprobleme folgt auch, dass in der Regel nur Teilprobleme eines ganzen dynamischen Problems optimal gelöst werden, da immer nur die Informationen bis zum aktuellen Zeitpunkt mit Sicherheit vorliegen. Zukunftsgerichtete Daten sind fast immer mit Unsicherheit behaftet. Daraus ergibt sich, dass zwar die Teilprobleme, z. B. im Rahmen einer rollierenden Planung, optimal gelöst werden können, deshalb aber noch keine Optimallösung des Gesamtproblems gegeben sein muss. Bei der dynamischen Tourenplanung kann der Dispo-

¹⁷¹ In Anlehnung an Psaraftis, H. (1988), S. 225 ff., wo sich die 12 Originalthesen befinden. Vgl. des Weiteren Psaraftis, H. (1995), S. 159 f., Larsen, A. (2001), S. 8 ff. und Ghiani, G. et al. (2003), S. 4.

¹⁷² Vgl. Larsen, A. (2001), S. 8.

nent nicht wie im statischen Fall alle Touren vollständig und abschließend planen,¹⁷³ sondern er muss sich für zu erwartende Änderungen Gestaltungsraum lassen.

- Unsicherheit zukünftiger Informationen:

Die Planung in einem dynamischen Umfeld wird zusätzlich durch den Mangel oder die Unsicherheit von Informationen erschwert. In der Regel muss eine rollierende Planung aufgrund der Datenunsicherheit erfolgen.¹⁷⁴ Sobald neue Daten bekannt werden, sollte der Planer (Disponent) versuchen, die neu eingetroffenen Kunden oder andere veränderte Rahmenbedingungen zu berücksichtigen und den Tourenplan dementsprechend zu aktualisieren. Mechanismen zur Aufnahme, Änderung und Speicherung der Daten sind daher in das System zu integrieren. Ferner kann die Durchführung von Prognosen die Ergebnisqualität eines Verfahrens positiv beeinflussen. Hierfür bilden entsprechende Prognoseverfahren oder andere statistische Verfahren, die z. B. stochastische Einflüsse abbilden, die Grundlage.

- Größere Wichtigkeit naheliegender Ereignisse:

Bei einer statischen Planung haben aufgrund der gegebenen Datenqualität zum Planungszeitpunkt alle Daten die selbe Wichtigkeit, während bei einer dynamischen Planung die Informationen mit fortschreitender Zeit sicherer oder erst bekannt werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass zeitlich naheliegende Ereignisse i. d. R. bestimmter sind als weiter in der Zukunft befindliche. Deshalb sollte den kurzfristigen Ereignissen eine höhere Aufmerksamkeit beigemessen und diese vordringlicher verarbeitet werden als die langfristigen.

- Überdenken bereits getroffener Entscheidungen:

Durch die Veränderung der Datenmenge und des Umfeldes im Zeitablauf können bereits getroffene Entscheidungen suboptimal werden. Somit findet gegebenenfalls die Revidierung von bereits getroffenen Zuordnungs- oder Reihenfolgeentscheidungen im Rahmen der Tourenplanungsalgorithmen statt. Diese Besonderheit erfordert auch vom Planer besondere Fähigkeiten, nämlich seine eigenen Entscheidungen zu überdenken und diese unter Umständen im Nachhinein zu korrigieren.

- Schnelle Reaktionszeit:

Zur Erreichung kurzer Reaktionszeiten bzw. Dispositionszeiträume werden zum einen einfache Rechenalgorithmen mit kurzen Rechenzeiten benötigt und zum anderen muss ein schneller Zugriff auf die erforderlichen Planungsdaten gewährleistet werden, um

¹⁷³ Vgl. Vogt, M. (1998), S. 45.

¹⁷⁴ Vgl. Domschke, W./ Scholl, A. (2002), S. 30.

schnellstmöglich auf neue Situationen reagieren zu können. Dazu sind entsprechende Informations- und Kommunikationstechnologien notwendig, mittels derer Informationen umgehend beschafft sowie Planungsergebnisse bspw. dem Fahrpersonal sofort mitgeteilt werden können.

- Mögliche Änderung der Zielfunktion:

Einige Autoren¹⁷⁵ diskutieren, dass neben den klassischen Kriterien wie Minimierung der zu fahrenden Gesamtstrecke oder der Fahrzeuganzahl bei dynamischen Dispositions- und Tourenplanungssystemen auch Zielstellungen wie Maximierung der Produktivität, Maximierung des Gewinns, Maximierung des Deckungsbeitrages, Maximierung des Throughputs, Minimierung der Wartezeit der Kunden, geringstmögliche Strafkosten für Zeitfensterüberschreitungen, Minimierung der vorzuhaltenden Ressourcen (Kapazität) usw. berücksichtigt werden sollen.¹⁷⁶ Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt jedoch die Beibehaltung der Zielstellung, einen kostenminimalen Tourenplan aufzustellen, wie in Kapitel 2.4 erwähnt. Da von der Annahme ausgegangen wird, ein dynamischer Kunde ist zu bedienen, soll ein dynamischer Kunde kostenminimal verfahrensgestützt in den bestehenden Tourenplan integriert werden.

- Veränderung der Zeitrestriktionen:

Zeitfensterbeschränkungen können bei der dynamischen Tourenplanung als weiche Grenzen interpretiert werden, da es für ein Unternehmen wirtschaftlich sinnvoller sein kann, eine Zeitrestriktion zu überschreiten, als die Bedienung des Kunden ganz abzulehnen.¹⁷⁷

- Geringere Flexibilität bzgl. Kapazitätsvariation:

Bei der dynamischen Tourenplanung ist der Zeitraum zwischen Planung und Ausführung der Touren i. d. R. kürzer als bei der statischen Tourenplanung. Daher sind Kapazitätsveränderungen bei der dynamischen Tourenplanung schwerer zu realisieren. Der Disponent kann in kürzester Zeit kaum die Fuhrparkgröße erhöhen oder verringern, genauso wie die Fremdvergabe von Transportleistungen nur begrenzt möglich ist.

- Einsatz der Warteschlangentheorie bei stark frequentierten Systemen oder unbestimmte Zurückstellung von Aufträgen:

Steigt die Ankunftsrate neuer Kunden im System über einen definierten Wert, kann die Warteschlangentheorie zum Einsatz kommen, um die Reihenfolge bei der Bearbeitung der Aufträge festzulegen und eine Überlastung des Systems zu vermeiden. Die Folge ei-

¹⁷⁵ Vgl. Lackner, A. (2003), S. 26, Psaraftis, H. (1988), S. 230 und Larsen, A. (2001), S. 9 f.

¹⁷⁶ Vgl. dazu auch Powell, W. et al. (1995), S. 186.

¹⁷⁷ Vgl. Lackner, A. (2003), S. 26.

ner Systemüberlastung können suboptimale Ergebnisse der Tourenplanungsverfahren sowie ineffiziente Prozesse sein. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass Kunden abgewiesen werden, die eine ungünstige geographische Lage aufweisen, was hohe Kosten oder geringe Verdienstmöglichkeiten bei der Belieferung des Kunden impliziert. Der Disponent seinerseits ist in diesem Zusammenhang darauf bedacht, unnötige Wartezeiten der Fahrzeuge zu vermeiden sowie den Gewinn bei der Bedienung der Kunden zu maximieren.

- Einzusetzende Verfahren und Inputdaten:

Klassische Verfahren der statischen Tourenplanung können nicht ohne Weiteres auf dynamische Problemstellungen angewendet werden, da u. U. nur eine ungenügende Berücksichtigung der aktuellen Fahrzeugpositionen und der verbleibenden Fahrzeugkapazitäten stattfindet. Verfahren zur dynamischen Tourenplanung müssen so konzipiert werden, dass sie diese Nebenbedingungen beachten. Auch BIANCHI fordert deshalb, dass Lösungsverfahren für dynamische Aufgabenstellungen nicht nur eine simple Adaption der klassischen statischen Methoden darstellen.¹⁷⁸ Ferner ist im Rahmen einer dynamischen Tourenplanung die Differenzierung in statische oder dynamische Modellierung je Inputkomponente möglich. Aufwand und Nutzen zwischen einer dynamischen und einer statischen Modellierung sowie den damit verbundenen Lösungsverfahren müssen sowohl für das Gesamtproblem als auch für einzelne Teilprobleme abgewogen werden. Es sollte eine Analyse erfolgen, welche der Daten als dynamisch in den Lösungsalgorithmus eingehen sollen und welche Daten als statisch approximiert werden können. Aus kostenmäßigen oder organisatorischen Gesichtspunkten muss es nicht immer sinnvoll sein, alle Inputdaten ständig zu erheben oder zu aktualisieren. Bestimmte dynamische Daten, von denen eine signifikante Verbesserung der Planungsergebnisse bei deren dynamischer Modellierung erwartet wird, sollten dynamisch modelliert werden.¹⁷⁹

¹⁷⁸ Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 2.

¹⁷⁹ Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt keine Analyse, welche Inputdaten in dynamischer Form und welche als statisch approximiert in den Planungsalgorithmus eingehen sollen. In dieser Arbeit wird aus Vereinfachungsgründen die Betrachtung der Dynamik auf die Anzahl der zu bedienenden Kunden beschränkt.

- Art der Aufgabe:

Eine Unterscheidung zwischen Einsammeln und Ausliefern ist im Rahmen einer dynamischen Tourenplanung zwingend notwendig.¹⁸⁰ Grund dafür ist die Tatsache, dass während einzelner Planungssequenzen nicht alle Fahrzeuge am Depot stationiert sind, sondern sich auf Tour befinden. Das Einsammeln von Gütern sowie das Ausliefern von homogenen Gütern (z. B. Heizöl) oder eines wenige Artikel umfassenden Güterspektrums (z. B. Haustürlieferung von Tiefkühlware) gestaltet sich dadurch einfacher als das Ausliefern eines heterogenen Güterspektrums (z. B. Versandhausartikel), da ein zusätzlicher Abholpunkt in eine bestehende Tour integriert werden kann, wenn ein Fahrzeug möglichst nah ist und genügend freie Kapazität (beim Einsammeln) bzw. ausreichend zusätzliche Warenmenge an Bord (beim Ausliefern homogener Güter) hat. Im Gegensatz dazu ist bei der Auslieferung von Waren (z. B. Versandhausartikel) i. d. R. davon auszugehen, dass bei bekannt werden eines neuen Belieferungspunktes das Fahrzeug die benötigte Ware nicht an Bord hat, sondern erst zum Depot zurückkehren muss, um diese aufzuladen. Inwiefern diese angesprochenen Sachverhalte Auswirkungen auf die Komplexität des Planungsproblems haben, soll im Folgenden analysiert werden. Es stellt sich demnach die Frage, ob die dynamische Tourenplanung ohne Weiteres bei jeder Problemstellung durchführbar ist.

	Art der Problemstellung	Zu beachtende Restriktionen und Handlungsempfehlung
1	Einsammeln	<ul style="list-style-type: none"> - verfügbare Kapazität ist ausreichend - Zeitrestriktionen werden nicht überschritten (max. Einsatzzeit Fahrzeug/Fahrer, Kundenzeitfenster anderer Kunden werden weiterhin eingehalten) → Nimm Kunden bestmöglich in eine Tour auf.
2	Ausliefern Stückgut, homogene Güter/ wenige Artikel	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeug hat zusätzlich benötigte Menge des Artikels an Bord, um dynamischen Kunden bedienen zu können - Zeitrestriktionen werden nicht überschritten → Nimm Kunden bestmöglich in eine Tour auf.
3	Ausliefern Stückgut, sehr heterogenes Produktspektrum/ Vielzahl von Artikeln	<ul style="list-style-type: none"> - welches Fahrzeug kann als nächstes am Depot vorbeifahren und benötigte Ware aufnehmen (Kapazitäts- und Zeitrestriktionen sind ebenfalls zu überprüfen) oder <ul style="list-style-type: none"> - ist der Start einer neuen Tour am Depot möglich, weil noch Fahrzeuge am Depot vorhanden sind oder ein Fahrzeug seine Tour beendet hat → Wähle beste Variante aus.

Tab. 3-1: Zu beachtende Restriktionen und Handlungsempfehlungen bei verschiedenen dynamischen Transportaufgaben

¹⁸⁰ Vgl. Kilby, P. et al. (1998), S. 2.

Wie Tabelle 3-1 zeigt kann beim Einsammeln von Gütern eine Implementierung der dynamischen Tourenplanung relativ einfach im Gegensatz zum Ausliefern erfolgen. Es muss "lediglich" eine Überprüfung der freien Restkapazität des Fahrzeuges, dem der Kunde zugeordnet werden soll, stattfinden. Ferner sind neben den Zeitfenstern des zusätzlichen Kunden die Zeitfenster der anderen Kunden der Tour zu beachten, d. h. dass durch die Aufnahme des neuen Kunden in die Tour keine Verletzung der anderen Zeitfenster erfolgt, sofern welche gegeben sind. Zudem können noch maximale Fahrzeug- oder Fahrereinsatzzeiten als Restriktionen vorliegen.

Die Auslieferung von Gütern untergliedert sich in den Transport homogener Güter, bzw. eines geringen Artikelspektrums, und den Transport eines heterogenen Produktspektrums, also einer Vielzahl von Artikeln. Bei ersterer Problemstellung, als Beispiel sei hier die Auslieferung von Heizöl zu nennen, gelten im Wesentlichen die gleichen Restriktionen wie beim Einsammeln von Gütern. Angenommen es liegen bereits einige statische Kunden vor, kann das Fahrzeug beim Verlassen des Depots eine größere Menge, als zur Bedienung der statischen Kunden notwendig ist, mitnehmen, um somit eine Bedienung potenzieller dynamischer Kunden vornehmen zu können ohne das Depot erneut aufsuchen zu müssen. Tritt dann tatsächlich ein weiterer Kunde auf, erfolgt die Überprüfung, ob die zusätzliche Menge des Fahrzeuges zur Bedienung reicht, neben den bereits beim Einsammeln von Gütern angesprochenen zu beachtenden zeitlichen Nebenbedingungen.

Handelt es sich hingegen um die Auslieferung verschiedenartiger Güter, bei der in der Regel auch nur die Güter aufgeladen werden, die die Kunden tatsächlich angefordert haben, stellt das Auftreten eines zusätzlichen Kunden parallel zur Durchführung der Auslieferung ein schwereres Planungsproblem dar. Ein Beispiel ist ein klassisches Versandhaus, bei dem aufgrund der Vielzahl an Artikeln keine Möglichkeit besteht, den Fahrern mehr als nur die bekannten Auslieferungsaufträge mitzugeben. Folgende Szenarien sind denkbar, wenn davon ausgegangen wird, dass die benötigte Ware des neuen Kunden sich im Depot bzw. Zentrallager befindet:

- Ein Fahrzeug steuert zu einem günstigen Zeitpunkt das Depot an, d. h. der Umweg über das Depot ist möglichst gering, und lädt die zusätzliche Ware auf. Planungsproblem: Neben den bekannten Zeit- und Kapazitätsrestriktionen ist diejenige Tour zu identifizieren, bei der in Summe sowohl die Einfügung des neuen Kunden in die Tour als auch das Integrieren eines zusätzlichen Depotstopps am günstigsten sind.
- Der neue Kunde wird in keine bereits angefangene Tour eingeplant, sondern das erste wieder am Depot eintreffende Fahrzeug bzw. ein noch freies am Depot vorhandenes Fahrzeug startet eine neue Tour, in der dieser neue Kunde enthalten ist und gegebenenfalls weitere Kunden, die während der Durchführung der bisherigen Touren dazugekommen sind.

Der zweite Punkt berührt die Batching-Strategien, bei denen neue Kunden zeitlich oder räumlich gebündelt werden und danach eine Auslieferung erfolgt, sofern ein freies Fahrzeug zur Verfügung steht.¹⁸¹

Zusammenfassend kann herausgestellt werden, dass das Einsammeln einfacher scheint, da hier ein neuer dynamischer Kunde bedient werden kann, wenn ein Fahrzeug möglichst nah ist und genügend freie Kapazität hat. Bei der Auslieferung von Waren muss in vielen Fällen beim Erscheinen eines neuen Kunden davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug die benötigte Ware nicht an Bord hat, sondern erst zum Depot zurückkehren muss. Fragen, die sich daraus ergeben, sind: Wann soll das Fahrzeug das Depot aufsuchen oder sollte es von vornherein mehrere Güter mitführen, sofern das überhaupt geht.

Im Folgenden soll anhand ausgewählter Problemstellungen der Rundreise- und Tourenplanung diskutiert werden, welche Probleme der statischen und welche der dynamischen Tourenplanung zuzuordnen sind. PSARAFTIS gibt zur Unterscheidung von statischer und dynamischer Tourenplanung einige Beispiele an,¹⁸² wobei es sich bei den ersten zwei Problemstellungen um statische Touren- bzw. Rundreiseplanung handelt:

1. Traveling Salesman Problem mit tageszeitabhängigen Fahrzeiten (Time-Dependent Traveling Salesman Problem (TDTSP))¹⁸³

Hierbei sind die Fahrzeiten zwischen den Knoten eines Straßennetzes nicht, wie im klassischen Fall der Tourenplanung, konstant, sondern sie unterliegen regelmäßigen bekannten Schwankungen. Aufgrund der Regelmäßigkeit der Schwankungen sind die Inputdaten im Voraus zuverlässig bestimmbar. Sämtliche andere Daten wie Kundenbedarfe, Kundenstandorte usw. sind ebenfalls determiniert. Eine Planung im Voraus, die diese regelmäßigen Schwankungen berücksichtigt, wird genau einmal durchgeführt, eine spätere Reoptimierung findet nicht statt. Somit handelt es sich beim TDTSP um ein *statisches* Planungsproblem, solange nur regelmäßige Änderungen, wie Berufsverkehr, berücksichtigt werden und keine zufälligen, wie Unfälle.

¹⁸¹ Vgl. Kapitel 3.4.2.

¹⁸² Vgl. Psaraftis, H. (1995), S. 151 ff.

¹⁸³ Vgl. Malandraki, C. (1989), S. 25 ff.

2. Wahrscheinlichkeitsbasiertes Traveling Salesman Problem (Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP))^{184 185}

Die Kundenstandorte sind beim PTSP bekannt.¹⁸⁶ Allerdings besitzt jeder Kunde eine Wahrscheinlichkeit dafür, ob eine Bedienung des Kunden je Tag zu erfolgen hat. Das bedeutet, die täglich zu bedienende Kundenanzahl ist eine Teilmenge aller bekannten Kundenstandorte. Alle anderen Inputdaten (z. B. Fahrzeiten) sind deterministisch und statisch. Unter Einbeziehung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Kunden wird a priori eine optimale Route bestimmt. Die Reihenfolge der zu besuchenden Kunden innerhalb dieser Route unterliegt im Nachhinein keinen Veränderungen mehr. Diese Reihenfolge gilt für jeden Tag. Zum Tourstart an jedem Tag ist bekannt, welche Kunden tatsächlich aufgetreten sind und welche nicht. Es erfolgt je Tag dementsprechend eine Eliminierung der nicht aufgetretenen Kunden aus der Tour, wobei die zuvor für alle potentiellen Kunden bestimmte Reihenfolge für die tatsächlichen bekannten Kunden beibehalten wird. Auch hier kann von *statischer* Tourenplanung gesprochen werden, da die Planung nur einmal erfolgt.

Im Gegensatz zu den zwei bisher beschriebenen Beispielen ist das folgende ein dynamisches Problem:

3. Dynamisches Traveling-Salesman-Problem (Dynamic TSP (DTSP))¹⁸⁷

Hier erscheinen unabhängig voneinander verteilte Kunden (bzw. Kundenstandorte) nach einer bestimmten Verteilung¹⁸⁸ innerhalb eines Tages, d. h. die Kunden bzw. Kundenaufträge haben *dynamischen* Charakter, weil sie erst im Zeitablauf bekannt werden. Die Fahrzeiten und Standzeiten sind bekannt und deterministisch. Die Routen werden beim Eingang neuer Inputdaten um- oder neugeplant, somit handelt es sich um *dynamische* Tourenplanung. Im Gegensatz zum PTSP (bzw. SVRP) müssen die Standorte der potentiellen Kunden nicht im Vorhinein bekannt sein, um a priori eine Tour oder einen Tourenplan konstruieren zu können, sondern durch die mehrmals tägliche Um- oder Neuplanung ist eine entsprechende Reaktion bei Auftritt des dynamischen Kunden möglich.

¹⁸⁴ Das PTSP gehört zur Gruppe der stochastischen Tourenplanungsprobleme (Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP)). Beim SVRP können verschiedene Inputfaktoren, wie Fahrzeit, Bedienzeit, Höhe der Kundennachfrage, stochastisch sein. Unter Anwendung mathematischer Modelle erfolgt hier ebenfalls die Bestimmung der Tour oder Touren im Voraus (a priori), die später nicht mehr neugeplant oder verändert werden, deshalb handelt es sich um *statische* Tourenplanung. Einen ausführlichen Überblick über stochastische Tourenplanung gibt SCHMIDTHÖFER. Vgl. Schmidthöfer, A. (2004), S. 30 ff. Das Tourenplanungsproblem mit stochastischen Entfernungen betrachten bspw. LAPORTE et al. Vgl. Laporte, G. et al. (1992), S. 161 ff.

¹⁸⁵ Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 293 ff. und Kapitel 3.4.1.

¹⁸⁶ Die Höhe eines Kundenbedarfes wird hier nicht beachtet, da es sich um eine TSP-Problemstellung handelt.

¹⁸⁷ Vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 244.

¹⁸⁸ Bei PSARAFTIS, der das DTSP erstmalig formuliert hat, treten die Kunden nach einem Poisson-Prozess mit der Ankunftsrate λ auf. Vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 244.

Wird die anfängliche Definition mit den gegebenen Beispielen verglichen, zeigt sich, dass es einige Grenzfälle gibt, deren Zuordnung nicht unproblematisch ist. Das liegt daran, dass neben der Güte der Daten (sicher oder unsicher) auch der Planungszeitpunkt und der Wiederholungsgrad der Planung beachtet wird. So sind bei Beispiel 2 die Daten der Realität zwar unsicher, diese werden aber über Wahrscheinlichkeiten, die als sicher gelten, abgebildet. Außerdem findet die Planung nur einmal statt. Die realen Daten lassen auf ein dynamisches Tourenplanungsproblem schließen, aber aufgrund der Sicherheit der für die Planung verwendeten Daten, d. h. die Wahrscheinlichkeiten, und des einmaligen Planungsprozesses handelt es sich um statische Tourenplanung.

In der Literatur findet nicht nur eine Unterscheidung in statische und dynamische Tourenplanung statt, in verschiedenen Arbeiten wird noch die stochastische Tourenplanung definiert.¹⁸⁹ Von stochastischer Tourenplanung wird in den meisten Fällen dann gesprochen, wenn die Entfernungen bzw. Fahrzeiten stochastisch sind oder wenn der Fahrer erst beim Kunden erfährt, wie viel er auszuliefern oder einzusammeln hat.¹⁹⁰ Beim PTSP oder SVRP fließen bei der Bestimmung der Touren Wahrscheinlichkeiten bezüglich der Inputdaten ein. Somit wird mittels stochastischer Modelle versucht, den dynamischen Charakter der Inputdaten zu antizipieren. Präzise Daten liegen bei diesen Problemstellungen i. d. R. erst kurz vor Start der Touren bzw. parallel zur Durchführung vor. Da die Planung im Vorhinein erfolgt, zählt die stochastische Tourenplanung zur statischen Tourenplanung. Würden noch Regeln für die Modifikation der Touren im Zeitablauf, also wenn genaue Daten vorliegen, festgelegt und auch ausgeführt werden, d. h. geschieht eine Veränderung der Touren während der Durchführung, wäre die stochastische Tourenplanung der dynamischen Tourenplanung zuzuordnen.¹⁹¹ Im Gegensatz zur stochastischen Tourenplanung liegt nach FLEISCHMANN/GIETZ deterministische Tourenplanung vor, wenn der betreffende Kunde und sein Bedarf zum Planungszeitpunkt vollständig bekannt sind.¹⁹² Ist die genaue Liefermenge für den Kunden unbestimmt, handelt es sich auch für FLEISCHMANN/GIETZ um ein stochastisches Problem und werden die Kunden selbst erst während des Planungshorizontes bekannt, nennt sie dies ein dynamisches Tourenplanungsproblem. Auch ICHOUA definiert das dynamische Tourenplanungsproblem dadurch, dass die Anzahl der zu erledigenden Aufträge nicht komplett im Vorhinein bekannt ist, sondern erst im Zeitablauf bestimmt wird.¹⁹³

¹⁸⁹ Vgl. z. B. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A3-53, Vogt, M. (1998), S. 45 und Gietz, M. (1994), S. 12.

¹⁹⁰ Vgl. Vogt, M. (1998), S. 45 und Gietz, M. (1994), S. 12.

¹⁹¹ In der Literatur ist i. d. R. jedoch nur der Fall zu finden, dass sich hinter dem Begriff stochastische Tourenplanung eine statische Planung verbirgt. Erst neueste Forschungsaktivitäten versuchen Dynamik und Stochastik zu verbinden. Vgl. Ghiani, G. et al. (2003), S. 3.

¹⁹² Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A3-53.

¹⁹³ Vgl. Ichoua, S. et al. (2003), S. 391.

Wie gezeigt wurde, erfolgt grundsätzlich eine Unterscheidung zwischen *statischer* und *dynamischer* Tourenplanung, wobei einige Autoren, wie FLEISCHMANN/GIETZ, zusätzlich noch gegenüber anderen Begrifflichkeiten wie *deterministisch* oder *stochastisch* abgrenzen. Jedoch haben alle diese Definitionen (z. B. FLEISCHMANN/GIETZ, ICHOUA et al., LACKNER, LARSEN, LUND et al., PSARAFTIS, VOGT)¹⁹⁴ zur statischen und dynamischen Tourenplanung gemeinsam, dass sie sich auf den Distributionsprozess bzw. Planungsablauf und darauf, wann die Planungszeitpunkte sind, beziehen, d. h. bei der *statischen* Tourenplanung wird einmal vorher und bei der *dynamischen* mehrmals auch parallel zur Tourdurchführung geplant. Somit kann von einer **Planungszeitpunkt-bezogenen** Definition gesprochen werden.

Einen anderen Ansatz, die **Inputdaten-bezogene** Definition, wählen GHIANI et al., die sich stärker auf die Art der eingehenden Inputdaten konzentrieren und ihre Definitionen zu verschiedensten Tourenplanungsproblemen darauf aufbauen. GHIANI et al. bilden zur Differenzierung unterschiedlicher Planungstypen, im Gegensatz zur bisher verwendeten Zweiteilung statisch vs. dynamisch, vier Kategorien, die sich aus der Kombination folgender vier Begrifflichkeiten ergeben:¹⁹⁵

- statisch: alle Daten sind zeitunabhängig
- dynamisch: zeitabhängige Daten
- deterministisch: der Planungsinput liegt mit Sicherheit zum Planungszeitpunkt vor
- stochastisch: Informationen sind mit Unsicherheit behaftet und treten zufällig auf

	deterministisch	stochastisch
statisch	deterministisch statisch	stochastisch statisch
dynamisch	deterministisch dynamisch	stochastisch dynamisch

Abb. 3-1: Tourenplanungskategorien nach GHIANI et al.

¹⁹⁴ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A3-53, Ichoua, S. et al. (2003), S. 391, Lackner, A. (2003), S. 20 ff., Larsen, A. (2001), S. 4 f., Lund et al. (1996), S. 2 f., Psaraftis, H. (1988), S. 223 ff. und Vogt, M. (1998), S. 45.

¹⁹⁵ Vgl. Ghiani, G. et al. (2003), S. 3.

Abbildung 3-1 zeigt, dass durch Kombination die vier Bereiche *deterministisch statisch*, *stochastisch statisch*, *deterministisch dynamisch* und *stochastisch dynamisch* aufgestellt werden, die eine überschneidungsfreie Zuordnung von Problemtypen ermöglichen sollen. Trotzdem ist die Kategorisierung eines Problemtyps nicht immer eindeutig bzw. steht in Kontrast zu den zuvor gegebenen Definitionen, wie später noch zu zeigen sein wird.

Bei einem *deterministisch statischen* Problem sind sämtliche Daten im Voraus bekannt, sie ändern sich im Zeitablauf nicht und sind sicher. Hierzu zählen beispielsweise das Standardproblem der Tourenplanung und die Tourenplanung mit heterogenem Fuhrpark.

Ein *stochastisch statisches* Problem liegt vor, wenn die Planung der Touren zwar im Vorhinein fix ist, aber unsichere Daten in die Planung einfließen, die während der Ausführung sicher werden. Die Unsicherheit resultiert aus mangelnden Informationen über zukünftige Kundenbedarfe, sie kann durch Schwankungen bei fremden Kapazitäten (Fahrzeuge oder Fahrer eines Logistikdienstleisters bei Fremdvergabe von Transportleistungen) oder durch Zufallseinflüsse auf das den Berechnungen zugrundeliegende Verkehrsnetz, wie Wetter und Unfälle, hervorgerufen werden. Das PTSP gehört dieser Gruppe an.

Der *deterministisch dynamische* Typ ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Daten zum Planungszeitpunkt bekannt sind, aber einige Informationen von der Zeit abhängen. GHIANI et al. führen als Beispiele das Tourenplanungsproblem mit Kundenzeitfenstern (VRPTW) und das Tourenplanungsproblem mit tageszeitabhängigen Fahrzeiten (TDVRP) an.

Die vierte Gruppe sind die *stochastisch dynamischen* Probleme, bei denen unsichere Informationen durch einen stochastischen Prozess (beispielsweise ein Poisson-Prozess) abgebildet werden können, d. h. eine Änderung der Daten erfolgt zufällig im Zeitablauf. So kann der Eingang von neuen Kunden während der Ausführung der Touren diesem Typus zugeordnet werden. Da die Bekanntgabe der Informationen sukzessive parallel zum Operationszeitraum erfolgt, findet die Disposition der Kunden *real-time* statt. Als Beispiel wäre hier die dynamische Tourenplanung zu nennen, wie sie in dieser Arbeit verstanden wird.

Durch die andere Herangehensweise der Wissenschaftler um GHIANI ergeben sich einige Abweichungen zu den zuerst erörterten Definitionen. Beispielsweise kann der Argumentation bzgl. der Tourenplanung mit tageszeitabhängigen Fahrzeiten gefolgt werden, wenn es sich um regelmäßige Schwankungen bei den Fahrzeiten handelt, da diese im Voraus bekannt sind (deterministisch), sich allerdings im Tagesablauf ändern (dynamisch) und sich lediglich auf die Inputdaten bezogen wird. Erfolgt jedoch die Betrachtung des Planungsprozesses, handelt es sich zweifelsfrei um statische Tourenplanung, da die Planung nur einmal stattfindet. Beim VRPTW ist allerdings schwieriger zu verstehen, wieso die Zeitfenster eine dynamische Komponente darstellen, da sie schon zum Planungszeitpunkt bekannt sind und sich

i. d. R. nicht ändern, was eine Einordnung des VRPTW in die Gruppe der deterministisch statischen Planungsprobleme rechtfertigen würde. Die stochastische Tourenplanung gehört zu der zweiten Gruppe – stochastisch statisch, da bei der stochastischen Tourenplanung die Generierung der Touren zum Planungszeitpunkt stattfindet und i. d. R. keine Veränderung des ausgeführten Planungsdurchlaufes mehr erfolgt.

Anhand der folgenden Abbildung erfolgt eine Systematisierung der unterschiedlichen Definitionsansätze. Auf der einen Seite befinden sich Autoren wie PSARAFTIS, LARSEN usw. und auf der anderen Seite die Wissenschaftlergruppe um GHIANI et al:

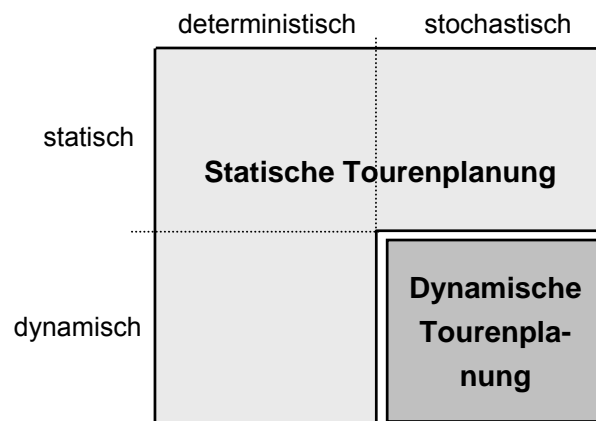


Abb. 3-2: Vergleich verschiedener Definitionsansätze zur Unterscheidung von statischer und dynamischer Tourenplanung

Die drei Gruppen *deterministisch statisch*, *stochastisch statisch* und *deterministisch dynamisch* der Inputdaten-bezogenen Definition von GHIANI et al. werden bei der Planungszeitpunkt-bezogenen Definition unter dem Begriff *statische* Tourenplanung vereint (vgl. Abbildung 3-2). Die *dynamische* Tourenplanung im Sinne der Planungszeitpunkt-bezogenen Definition ist gleichzusetzen mit der Gruppe *stochastisch dynamisch* der Inputdaten-bezogenen Definition von GHIANI et al. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Planungszeitpunkt-bezogenen Definition zur Unterscheidung zwischen *statischer* und *dynamischer* Tourenplanung gefolgt.

Auch PSARAFTIS beschäftigt sich mit der Charakterisierung der Inputinformationen. Er extrahiert die Entwicklung der Informationen, die Qualität der Informationen, die Verfügbarkeit der Informationen und den Informationsverarbeitungsprozess als vier Hauptpunkte, denen bei der dynamischen Tourenplanung eine entscheidende Rolle zukommt.¹⁹⁶

¹⁹⁶ Vgl. Psaraftis, H. (1995), S. 153 f.

- Entwicklung der Informationen (statisch/ dynamisch): Hier wird nochmals der Unterschied zwischen statisch und dynamisch erklärt, der bereits bei der Definition der dynamischen Tourenplanung gegeben wurde. Statische Daten sind im Voraus bekannt und ändern sich zu keinem Zeitpunkt während der gesamten Ausführung der gebildeten Touren. Im Gegensatz dazu werden dynamische Daten erst im Laufe der Zeit bekannt oder ändern sich.
- Qualität der Informationen (Sicherheit/ Prognose/ Wahrscheinlichkeiten): Je nach Problemart können einige oder auch alle Daten mit Sicherheit über den gesamten Prozess bekannt sein. Andere Daten wiederum sind nicht sicher, können aber prognostiziert werden, oder es ist eine Spezifizierung anhand von Wahrscheinlichkeiten möglich. Die Qualität der Informationen nimmt zu, je geringer der Abstand zwischen aktuellem Zeitpunkt und Eintrittszeitpunkt eines Ereignisses ist.
- Verfügbarkeit von Daten (lokal/ global): Informationen können lokal zugänglich werden, z. B. wenn der Fahrer eines Heizöltankwagens am Tank des Kunden erkennt, wie hoch dessen Bedarf an Heizöl ist, oder es kann eine globale Bereitstellung der Daten erfolgen, z. B. informiert ein zentrales Datenverarbeitungssystem den Disponenten und alle Fahrer über die Kundenbedarfe. Ferner führen die ständigen Fortschritte im Bereich der Informations- und Kommunikationssysteme zu einer verbesserten Informationsverfügbarkeit und einer größeren Datenfülle. Aufgabe des Disponenten ist dabei auch, beispielsweise nur die Daten herauszufiltern und an die Fahrer weiterzugeben, die für deren momentane Aufgabe relevant sind.
- Informationsverarbeitung (zentral/ dezentral): In Anlehnung an die Differenzierung in lokal und global bei der Bekanntgabe von Informationen, kann bei der Datenverarbeitung in zentral und dezentral unterschieden werden. Ein zentrales System liegt vor, wenn die Verarbeitung von einem Zentralrechner aus erfolgt. Findet die Datenverarbeitung an mehreren Arbeitsplätzen statt, so z. B. auch im LKW des Fahrers, wird von einem dezentralen System gesprochen.

Wie schon bei den Arten der Inputdaten für die Tourenplanung, die dynamisch sein können, oder bei den gegebenen Beispielen zur Unterscheidung von statischen und dynamischen Tourenplanungsproblemen gezeigt, kann der Begriff "Dynamik" in verschiedenen Bereichen auftreten und auf unterschiedliche Begriffe bezogen werden. POWELL et al. unterteilt beispielsweise in Dynamik des Problems, des angewendeten Modells oder bzgl. der praktischen Anwendung,¹⁹⁷ d. h. er analysiert in welcher Ebene die Dynamik auftritt.

¹⁹⁷ Vgl. Powell, W. et al. (1995), S. 142 f.

1. Ein Problem ist dynamisch, wenn der Input im Zeitablauf variiert.
2. Werden die Wechselwirkungen der Handlungen im Rahmen des Modells über die Zeit beachtet und verarbeitet, handelt es sich um ein dynamisches Modell.
3. Die wiederholte Lösung des zugrundeliegenden Modells bei bekannt werden neuer Informationen bedeutet Dynamik in der Anwendung.

Zu 1. sei ergänzt, dass bei variierenden Inputfaktoren von einem dynamischen Problem gesprochen werden kann, wobei POWELL et al. unterscheidet, ob die Dynamik im Vorhinein bekannt ist, wie bei tageszeitabhängigen Fahrzeiten, oder ob die Informationen einer ständigen Änderung unterliegen, wie bei real-time Kundenaufträgen. Trotz der Dynamik im Problem muss aber noch nicht notwendigerweise die Beachtung der Dynamik im Problem erfolgen. Zum Beispiel könnte, obwohl Dynamik im Problem vorliegt, die Anwendung von statischen Modellen und Lösungsverfahren stattfinden. Bei Punkt 2 findet im Gegensatz zu Punkt 1 die Abbildung des dynamischen Problems in einem Modell statt. Es ist also die Fähigkeit vorhanden, dynamische Strukturen und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Elementen bzw. Daten des dynamischen Planungsproblems mathematisch zu beschreiben. Erfolgt eine wiederholte Lösung des dynamischen Tourenplanungsproblems, z. B. im Rahmen einer rollierenden Planung, wie im Kapitel 4 bei der Beschreibung der durch den Autor neu entwickelten Verfahren erläutert, ist die Stufe, die bei 3. durch POWELL et al. beschrieben wird, erreicht.

3.2 Literaturüberblick

Die ersten Aufsätze zur stochastischen und/ oder dynamischen Tourenplanung erschienen im Wesentlichen in den letzten 15-20 Jahren. Der Fokus der einzelnen Werke geht in sehr unterschiedliche Richtungen. Zu beachten ist auch, dass die Begriffe *dynamic* (*dynamisch*), *real-time* und *on-line* in der Literatur teilweise synonym verwendet werden.¹⁹⁸ In diesem Kapitel erfolgt zunächst ein chronologischer Überblick ausgewählter Werke im Bereich dynamischer Tourenplanung. Im Anschluss daran werden die quantitativ-orientierten Arbeiten nach den Kriterien Problemstellung, dynamische Inputdaten und verwendetes Lösungsverfahren ausgewertet.

Eine der ersten Arbeiten, bei der Tourenplanung unter Berücksichtigung dynamischer Aspekte betrachtet wird, stammt von BELL et al. (1983)¹⁹⁹. Bei der dargestellten Problemstellung handelt es sich um die Auslieferung von Industriegasen von einem Depot zu mehreren Endkunden. Geplant wird für zwei bis fünf Tage im Voraus, wobei der Fokus auf dem aktuell betrachteten Tag liegt. Der Auftragseingang ist dynamisch, allerdings mit der Einschränkung, dass die Aufträge des aktuellen Tages bekannt sind. Somit wird von BELL et al. eine Dynamik auf Tagesbasis unterstellt, denn die Informationen der folgenden Tage gelten als unvollständig und unsicher. Neben der Unsicherheit bezüglich der zu beliefernden Kunden der nächsten Tage ist auch die Liefermenge dynamisch. Der exakte Bedarf eines Kunden wird erst ex post nach Auffüllung der Behälter ermittelt. Das hier untersuchte Tourenplanungsproblem ist ferner durch einen heterogenen Fuhrpark und Kundenzeitfenster charakterisiert. Die Erstellung des Tourenplans erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird eine Menge möglicher Ein-Tages-Touren bestimmt. In einem zweiten Schritt findet durch Lösung eines MIP-Modells (Mixed Integer Program) unter der Zielsetzung der Deckungsbeitragsmaximierung die Auswahl der zu fahrenden Touren statt. Grundsätzlich handelt es sich hier um ein heuristisches Vorgehen, bei dem Lösungen innerhalb weniger Minuten generiert werden können.

PSARAFTIS (1988)²⁰⁰ befasst sich ebenfalls als einer der ersten mit der dynamischen Tourenplanung. Er vergleicht statische und dynamische Tourenplanung, unter Herausfilterung wesentlicher Faktoren²⁰¹ anhand derer beide Problemstellungen differenziert werden können. Ferner werden einige allgemeine Regeln aufgestellt, die ein Verfahren zur Lösung einer dynamischen Problemstellung besitzen sollte, und es wird untersucht, ob Vorgehens- und Verfahrensprinzipien der statischen Modelle auf eine dynamische Umwelt transferiert werden

¹⁹⁸ Vgl. Psaraftis, H. (1995), S. 151.

¹⁹⁹ Vgl. Bell, W. et al. (1983), S. 4 ff.

²⁰⁰ Vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 223 ff.

²⁰¹ Vgl. zu den Faktoren Kapitel 3.1.

können. PSARAFTIS beschreibt außerdem einen Algorithmus - MORSS (M.I.T. Ocean Routing and Scheduling System)²⁰² - zur Lösung von dynamischen Routenproblemen im Bereich der Seeschifffahrt. Entwickelt wurde dieser Algorithmus für das U.S. Military Sealift Command (MSC) zur Disposition von Frachtschiffen in Notsituationen. Ziel des Verfahrens ist es, die Frachtaufträge den Schiffen so zuzuordnen, dass die Zeitfenster der Frachtaufträge eingehalten, Staus an den Häfen vermieden und die Schiffe möglichst gut ausgelastet werden. Nach PSARAFTIS ist das Planungsproblem dynamisch, da sich die Umweltbedingungen ständig ändern. Die Disposition nach dem MORSS-Algorithmus erfolgt mittels einer rollierenden Planung, wobei unter Berücksichtigung aller bekannten Aufträge nur jeweils Zuordnungsentscheidungen für die unmittelbar anstehenden Frachtaufträge (kurzfristige Entscheidungen) getroffen werden, die endgültig sind. Zeitlich weiter entfernt liegende Entscheidungen werden bis zu einem späteren Zeitpunkt zurückgestellt, da angenommen wird, dass sich dadurch die Qualität der Daten verbessert und somit bessere Zuordnungsentscheidungen erfolgen. Ein Ausblick bezüglich weiterer Forschungsgebiete und eine kurze Einführung in das DTSP schließen diese Veröffentlichung ab.

In einem weiteren Werk setzt PSARAFTIS (1995)²⁰³ seine Analysen zur dynamischen Tourenplanung fort. Schwerpunkt ist jetzt die Betrachtung der Entwicklungen im Bereich der technischen Komponenten zur Unterstützung der Tourenplanung, wie z. B. Electronic Data Interchange (EDI), Geographic Information Systems (GIS), Global Positioning Systems (GPS) oder Intelligent Vehicle-Highway Systems (IVHS), sowie sich daraus neuergebende Forschungsschwerpunkte. Ferner werden in dieser Arbeit Anwendungsgebiete dynamischer Tourenplanungsprobleme und deren Wichtigkeit diskutiert sowie eine Klassifikation bezüglich verschiedenster Ausprägungsarten der Inputdaten aufgestellt und deren Bedeutung erörtert.

BERTSIMAS und VAN RYZIN (1991)²⁰⁴ führen in ihrer Arbeit das Dynamic Traveling Repairman Problem (DTRP) ein. Dabei handelt es sich um ein Traveling Salesman Problem, bei dem als Zielfunktion die Wartezeiten der Kunden minimiert werden statt der Gesamtentfernung bzw. Gesamtkosten. Informationen über die Zukunft sind stochastisch und die zukünftigen Kundenbedarfe variieren im Zeitablauf, somit sind sie dynamisch. Motiviert wurden BERTSIMAS und VAN RYZIN von dem von PSARAFTIS (1988) beschriebenen DTSP²⁰⁵. Im Gegensatz zum DTSP ist das DTRP in einer konvexen, beschränkten Ebene definiert. Die Kunden werden mit einer Ankunftsrate λ bekannt und sind unabhängig voneinander und gleichmäßig in der Ebene verteilt. Das Fahrzeug bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit und bei

²⁰² Für den genauen Ablauf des Verfahrens vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 235 ff. oder Stumpf, P. (1998), S. 115 f.

²⁰³ Vgl. Psaraftis, H. (1995), S. 143 ff.

²⁰⁴ Vgl. Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1991), S. 601 ff.

²⁰⁵ Vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 244 und Kapitel 3.1.

jedem Kunden ist eine Standzeit zu beachten. Ziel der Untersuchung dieser Problemstellung ist es, eine optimale Strategie zu finden, die die Systemzeit minimiert, welche sich aus der Wartezeit der Kunden und der Standzeit beim Kunden ergibt. Verschiedene Strategien werden analysiert, auch in Abhängigkeit von der Ausprägung der Ankunftsrate λ . Ausführliche Informationen zu den Strategien werden in Kapitel 3.4.2 gegeben.

POWELL et al. (1995)²⁰⁶ beschäftigen sich hauptsächlich mit Stochastic Programming Based Models. Zum einen erfolgt die Vorstellung einer Gruppe von Modellen, die das Tourenplanungsproblem mit unsicheren Kundenbedarfen formulieren, und zum anderen wird gezeigt, wie das dynamische Flottenmanagementproblem als mehrstufiges dynamisches Netzwerk mit zufälligen Relationskapazitäten formuliert werden kann. Des Weiteren findet aber auch die Analyse verschiedener dynamischer Problemstellungen statt, so z. B. das dynamische Zuordnungsproblem (Dynamic Traffic Assignment Problem), bei dem Komplettladungen²⁰⁷ zu Fahrzeugen so zuzuordnen sind, dass die Güter am kostengünstigsten von ihrem Abholort zu ihrem Zielort gelangen. Dabei tritt der Bedarf nach dem Transport dieser Komplettladungen real-time auf.²⁰⁸ Ferner diskutieren die Autoren besondere Aspekte der Lösungsauswertung, d. h. der Beurteilung der Qualität der Lösung, die statische und dynamische Modelle wesentlich unterscheidet. Die Autoren stellen heraus, dass es bei statischen Modellen bedeutend einfacher ist, eine angemessene Zielfunktion zu ermitteln, die gleichzeitig auch einen geeigneten Maßstab zur Bewertung der Lösungsgüte darstellt. Hingegen haben die in dynamischen Modellen verwendeten Zielfunktionen, die zum Treffen von Entscheidungen innerhalb eines fortlaufenden Planungshorizontes angewendet werden, meist wenig mit den Messinstrumenten zur Beurteilung der Lösungsgüte für dynamische Modelle zu tun.

BERTSIMAS und SIMCHI-LEVI (1996)²⁰⁹ geben einen Überblick über Tourenplanungsprobleme, welcher sowohl statisch deterministische als auch dynamisch stochastische Problemstellungen beinhaltet. Zum Beispiel werden Modelle betrachtet, die Wahrscheinlichkeitstheorie verwenden, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Sie analysieren das Lösungsverhalten und die Struktur der beschriebenen Algorithmen, um dadurch Rückschlüsse zu erhalten, welche Auswirkungen das Verkehrsaufkommen, die Standzeiten beim Kunden, die Fahrzeuganzahl, -geschwindigkeit und -kapazität, die Größe des Liefer- bzw. Kundengebietes und die Verteilung der Kunden über die Fläche auf die Lösungsgüte der Algorithmen hat. BERTSIMAS und SIMCHI-LEVI ziehen Parallelen zwischen statischen und dynamischen Problemen und postu-

²⁰⁶ Vgl. Powell et al. (1995), S. 141 ff.

²⁰⁷ Als Beispiel für Komplettladungen nennen POWELL et al. den Transport von Containern. Vgl. Powell et al. (1995), S. 195.

²⁰⁸ Vgl. Powell et al. (1995), S. 143.

²⁰⁹ Vgl. Bertsimas, D./ Simchi-Levi, D. (1996), S. 286 ff.

lieren, dass exakte und heuristische Verfahren der statischen Tourenplanung die Grundlage für Algorithmen, die dynamische Situationen lösen sollen, bilden. Ferner argumentieren sie, dass die Einbeziehung der Stochastik zu effizienteren Verfahren führen kann. Zum Beispiel ist die a priori Optimierung von Tourenplanungsproblemen sehr hilfreich, wenn Rechenzeiten verkürzt werden sollen oder die entsprechende Technik nicht zur Verfügung steht. BERTSIMAS und SIMCHI-LEVI analysieren die Verfahren hinsichtlich der Problemgröße, die sie im Stande sind zu lösen, und der Robustheit gegenüber sich verändernden Daten in Bezug auf Menge und Struktur. Außerdem ist nach Meinung der Autoren zu beachten, dass es nicht ausreicht, entwickelte Verfahren empirisch an einigen Standardproblemtypen zu testen, sondern auch die zugrundeliegende Problemstruktur ist eingehend zu analysieren und vom Standard abweichende Fälle sind zu betrachten.

LUND et al. (1996)²¹⁰ zeigen anhand von Simulationen, dass die Verfahrensweise, ein statisches Tourenplanungsproblem immer dann zu lösen, wenn ein dynamischer Input bekannt wird, nur bei schwach oder sogar sehr schwach dynamischen Tourenplanungsproblemen befriedigende Planungsergebnisse erzielt. Der Grad der Dynamik (Degree of Dynamism (DOD)), der das Verhältnis von der Anzahl dynamischer Kunden zur Gesamtkundenanzahl angibt, wird in diesem Zusammenhang eingeführt.²¹¹ Nach LUND et al. darf der Grad der Dynamik maximal 30 % betragen, damit modifizierte statische Algorithmen die Fülle an dynamischen Daten verarbeiten können. Hauptgrund hierfür ist die Beachtung von Kundenzeitfenstern im Verfahren von LUND et al. Dabei wird durch Simulationen gezeigt, dass bei steigendem Grad der Dynamik die Wartezeit von Fahrzeugen zwischen der Bedienung zweier Kundenzeitfenster stark zunimmt. Eine ausführliche Vorstellung des verwendeten Verfahrens erfolgt in Kapitel 3.4.2 der hier vorliegenden Arbeit.

GENDREAU und POTVIN (1998)²¹² diskutieren eine Reihe von Fragen, die sich bei der Beschäftigung mit lokal²¹³ orientierten Tourenplanungsproblemen ergeben, welche aber immer noch nicht umfassend erforscht sind. Zum Beispiel sollten Prognosen über das Auftreten von Kundenbedarfen in die dynamische Tourenplanung einbezogen werden, damit die Generierung des Tourenplans möglichst vorausschauend stattfindet. Des Weiteren darf nicht nur die

²¹⁰ Vgl. Lund et al. (1996), S. 1 ff.

²¹¹ Vgl. Kapitel 3.5 sowie Lund et al. (1996), S. 3.

²¹² Vgl. Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (1998), S. 115 ff.

²¹³ GENDREAU und POTVIN unterscheiden Tourenplanungsprobleme anhand der Größe des Operationsgebietes in lokal, regional, national und international. Unter lokalen Tourenplanungsproblemen verstehen GENDREAU und POTVIN bspw. die Beschränkung auf Ballungsgebiete. Ferner geben sie an, dass bei lokalen Tourenplanungsproblemen i. d. R. ein engerer Planungshorizont zu beachten ist und dass diese Planungsprobleme infolgedessen stärker dynamisch sind. Vgl. Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (1998), S. 115. Kurierdienste, Dial-a-ride-Systeme und Notrufdienste nennen GENDREAU und POTVIN als Beispiele für lokal orientierte Tourenplanungsprobleme. Vgl. Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (1998), S. 116.

Unsicherheit im Rahmen des Auftretens der Kundenbedarfe beachtet werden, sondern die Unsicherheit in Verbindung mit der Stornierung von Kundenaufträgen oder Verzögerungen bei der Bedienung der Kunden ist gleichfalls zu berücksichtigen. Vor dem Hintergrund der Praxisrelevanz dynamischer Tourenplanung wird der Fokus in dieser Arbeit auf Dial-a-ride-Probleme, KEP-Problemstellungen und Reparatur- bzw. Pannendienste gelegt. Bei der dynamischen Tourenplanung erfolgt i. d. R. eine wiederholte Planung der Touren. GENDREAU und POTVIN merken an, dass aufgrund der vielen Informationen, die in Echtzeit zur Verfügung stehen, eine sofortige Revidierung des aktuellen Zielpunktes eines Fahrzeuges erfolgen kann.²¹⁴ Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Durchführung von Worst-case-Analysen in Hinblick auf das Nichtvorliegen aller Daten im Vorfeld der Planung, d. h. in wie weit weicht die Lösung im schlimmsten Fall vom Optimum ab, wenn im Voraus bereits bekannt wäre, wann welche Informationen eintreffen. Abschließend befürworten die Autoren die Erforschung einer parallelen Implementierung.

GENDREAU et al. (1999)²¹⁵ entwickelten ein auf einem Tabu Search Algorithmus basierendes Verfahren, das Tourenplanungsprobleme mit Kundenzeitfenster löst, aber keine Kapazitäten berücksichtigt. Dieser Algorithmus, dessen Entwicklung zunächst für statische Probleme erfolgte, wurde für dynamische Situationen weiterentwickelt. Die Arbeit beinhaltet auch einige Testergebnisse zu diesem Verfahren.

ICHOUA et al. (2000)²¹⁶ führen die Arbeit von GENDREAU et al. fort. Es erfolgt die Anwendung des Verfahrens im KEP-Bereich. Schwerpunkt der Arbeit ist die Analyse, welche Auswirkungen der Auftritt eines neuen Kunden auf den Kurs des Fahrzeuges hat, d. h. wie und wann kann der Kurs des Fahrzeuges an die neue Situation angepasst werden. Die Arbeit enthält außerdem einen kurzen Literaturüberblick zur dynamischen Tourenplanung. Detailliert wird in Kapitel 3.4.2 auf die in den Arbeiten von GENDREAU et al. und ICHOUA et al. dargestellte Methode eingegangen.

ICHOUA, GENDREAU und POTVIN (2003)^{217 218} beschäftigen sich in ihrem 2003 veröffentlichten Werk mit tageszeitabhängigen Fahrzeiten. Allerdings wenden sie ihre Methode auch in einem dynamischen Umfeld an. Als Verfahren wird ein für tageszeitabhängige Fahrzeiten

²¹⁴ Bei dem in Kapitel 4 vorgestellten, durch den Autor neu entwickelten Verfahren und bei dem von ICHOUA et al. (2000) präsentierten Verfahren besteht die Möglichkeit, den aktuellen Fahrzeugzug zu ändern. Vgl. Kapitel 4 und Ichoua, S. et al. (2000), S. 430.

²¹⁵ Vgl. Gendreau, M. et al. (1999), S. 381 ff.

²¹⁶ Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 426 ff.

²¹⁷ Vgl. Ichoua, S. et al. (2003), S. 391 ff.

²¹⁸ Da die Arbeit von ICHOUA, GENDREAU und POTVIN (2003) auf den Arbeiten von GENDREAU et al. (1999) und ICHOUA et al. (2000) aufbaut, wird sie entgegen der chronologischen Reihenfolge bereits hier behandelt.

weiterentwickelter Tabu Search Algorithmus²¹⁹ verwendet, der auf TAILLARD et al. (1997)²²⁰ und auf GENDREAU et al. (1999)²²¹ zurückgeht. Zur betrachteten Problemstellung sei ergänzt, dass es sich um ein aus dem Langstrecken-KEP-Bereich stammendes Problem handelt. Die Briefe und Pakete der Kunden, unter denen sich auch einige dynamische Kunden befinden, werden abgeholt und an einem zentralen Punkt zusammengeführt, danach erfolgt die gemeinsame Beförderung im Hauptlauf. Bei der Problemstellung sind Kundenzeitfenster zu beachten, aber es werden keine Kapazitätsrestriktionen berücksichtigt, da lediglich der Transport von kleinen Gütern (z. B. Briefe oder Päckchen) erfolgt.

BIANCHI (2000)²²² nimmt eine Einteilung der dynamischen Tourenplanungsverfahren in zwei Gruppen vor. Die eine Gruppe enthält strategisch-orientierte Arbeiten, deren entwickelte Strategien zur Bildung von Teilproblemen dienen, und zu der anderen Gruppe gehören die heuristisch-orientierten Arbeiten, die unter Fixierung einer Strategie Teilprobleme der dynamischen Tourenplanung lösen. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass ein dynamisches Tourenplanungsproblem (Gesamtproblem) in einzelne Teilprobleme zerlegt wird. Ein solches Teilproblem ergibt sich, wenn ein neuer Kunde eintrifft. Die Verfahren FCFS, TSP usw. von BERTSIMAS und VAN RYZIN zählen beispielsweise zu der Gruppe der strategisch-orientierten Arbeiten und das Tabu Search Verfahren von GENDREAU et al. z. B. wird der Gruppe der heuristisch-orientierten Arbeiten zugeordnet. Möglichen weiteren Forschungsbedarf sieht BIANCHI bei der Konstruktion von Verfahren zur Lösung des dynamischen Tourenplanungsproblems, das auf einem Graphen definiert ist, ferner bei der Worst-case-Analyse von dynamischen Tourenplanungsproblemen und bei der Untersuchung, in wie weit eine Lösung im Rahmen eines dynamischen Tourenplanungsproblems hätte besser sein können, wenn alle Informationen im Voraus bekannt gewesen wären.

LARSEN (2001)²²³ behandelt zunächst Grundlagen, wie die Definition und die Unterschiede von statischer und dynamischer Tourenplanung sowie die praktische Relevanz dynamischer Tourenplanung. Ferner wurde die klassische Kennzahl von LUND et al. Grad der Dynamik²²⁴ dahingehend weiterentwickelt, dass die zeitliche Lage der Kundenzeitfenster sowie die Eingangszeit der dynamischen Kunden berücksichtigt werden, da diese maßgeblichen Einfluss auf die Komplexität der Planungsaufgabe und die damit einhergehende Lösungsgüte haben. Daraufhin entstanden zwei neue Kennzahlen (*edod* und *edod-tw*)²²⁵ zur Beschreibung dy-

²¹⁹ Vgl. zu Tabu Search auch Kapitel 2.7.3.

²²⁰ Vgl. Taillard, E. et al. (1997), S. 170 ff.

²²¹ Vgl. Gendreau, M. et al. (1999), S. 381 ff.

²²² Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 1 ff.

²²³ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 1 ff.

²²⁴ Vgl. Lund et al. (1996), S. 3 und Kapitel 3.5.

²²⁵ Vgl. Kapitel 3.5.

namischer Tourenplanungsprobleme. Je später die dynamischen Kunden im Planungshorizont auftreten desto höher ist der *edod* bzw. der *edod-tw* und somit die Dynamik in dem System. Beim *edod-tw* wird zusätzlich die Zeitspanne zwischen dem Auftritt des dynamischen Kunden und seinem spätest möglichen Bedienungszeitpunkt gemessen, wobei eine kurze Zeitspanne eine hohe Dynamik darstellt. Nach LARSEN konnten allerdings noch keine zufriedenstellenden empirischen Ergebnisse erbracht werden, die die Vorteilhaftigkeit der neuen Kennzahlen gegenüber der klassischen Kennzahl Grad der Dynamik belegen. Weiterer Forschungsbedarf ist damit gegeben. Aus der Arbeit mit den Kennzahlen zur Beschreibung eines dynamischen Tourenplanungsproblems zum einen und mit der Beschäftigung von Zielfunktionen für das Optimierungsproblem zum anderen findet in diesem Werk eine Klassifizierung verschiedener praktischer Anwendungen statt. Derartige Klassifizierungen sind beispielsweise die Einteilung in schwach, moderat und stark dynamische Systeme. Des Weiteren führt LARSEN das Partially Dynamic Traveling Repairman Problem (PDTRP) als eine Erweiterung des Dynamic Traveling Repairman Problem (DTRP)²²⁶ ein, bei dem neben den im Zeitablauf eingehenden dynamischen Kunden zu Planungsbeginn ein Anteil statischer Kunden vorliegt. Zur Lösung des PDTRP werden die in der Veröffentlichung von BERTSIMAS UND VAN RYZIN²²⁷ vorgestellten Politiken First Come First Serve Politik (FCFS), Stochastic Queue Median Politik (SQM), Traveling Salesman Problem Strategie (TSP), Bester Nachfolger Strategie (NN) usw. angewendet.²²⁸ Die besten Ergebnisse liefert die NN-Politik. LARSEN stellt außerdem einen linearen Zusammenhang zwischen dem Grad der Dynamik und der Rundreiselänge heraus. Ein weiteres Modell, welches im Blickpunkt der Betrachtung steht, ist das Dynamic Vehicle Routing Problem Time Window (DVRPTW). Unter anderem wird hier die Alternative „Optimierung bei jedem Auftritt eines neuen Kunden“ mit der Alternative „Zusammenfassung mehrerer neuer Kunden“ bis zu einer festgelegten Grenze und anschließende Optimierung, d. h. sogenannte Batching-Strategien, verglichen. Zudem erfolgt die Einführung des A-priori Dynamic Traveling Salesman Problem Time Window (ADTSPTW), bei dem unter Einbeziehung von a priori Informationen über zukünftige Kunden bessere Planungsergebnisse erzielt werden sollen. Obwohl erste empirische Tests nur geringes Verbesserungspotenzial offenbarten, wird noch Forschungsbedarf vermutet. Die Analyse einer Fallstudie aus dem Bereich Langstrecken-KEP-Dienste schließt die Arbeit ab. Auch zu den von Larsen behandelten Verfahren werden weitere Informationen in Kapitel 3.4.2 gegeben.

²²⁶ Vgl. Kapitel 3.4.2.

²²⁷ Vgl. Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1991), S. 607 ff.

²²⁸ Ausführlich werden die Politiken in Kapitel 3.4.2 behandelt.

PANKRATZ (2002)²²⁹ betrachtet ein dynamisches Pick-up-and-delivery-Problem für den speditionellen Fernverkehr bei dem der Transport mehrerer Aufträge auf einem Fahrzeug erfolgt.²³⁰ Dabei muss der Beladeort eines Auftrages immer vor dem Entladeort desselben Auftrages angefahren werden.²³¹ In die Modellierung der Problemstellung fließen als weitere Schwerpunkte die Berücksichtigung der Fremdvergabe von Aufträgen sowie der sofortige Fahrzeugwiedereinsatz nach dem Tourenende ein. Außerdem wird der dynamische Auftragseingang beachtet. Das von PANKRATZ abgegrenzte Problem bezeichnet er als „dynamisches speditionelles Dispositionsproblem mit Fremdvergabe“ (DSDPFV)²³². Zur Lösung des Problems wird die Verfahrensklasse der Genetischen Algorithmen herangezogen. Eine Schwierigkeit im speditionellen Fernverkehr stellen die sich derzeit ständig ändernden Frachttagespreise dar. Diese werden im Rahmen der Arbeit angenähert. Als Weiterentwicklung für sein Dispositionssystem stellt sich PANKRATZ vor, dass Fahrzeugausfälle durch Unfälle, Pannen usw. vom System sofort in Tourenplanänderungen umgesetzt werden.

Bei der Arbeit von GHIANI et al. (2003)²³³ ist die Definition statischer und dynamischer Tourenplanungsprobleme erwähnenswert, die bereits in Kapitel 3.1 erörtert wurde, da GHIANI et al. nicht nur zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung unterscheiden, sondern die Verteilung deterministisch statisch, stochastisch statisch, deterministisch dynamisch und stochastisch dynamisch verwenden.²³⁴ Ferner werden praktische Anwendungsgebiete dynamischer Tourenplanung erörtert, einige Besonderheiten von dynamischer Tourenplanung im Gegensatz zu statischer Tourenplanung diskutiert und der Grad der Dynamik erklärt. Einen weiteren Schwerpunkt stellt der Abriss der wichtigsten Verfahren zur dynamischen Tourenplanung dar, bei dem in sequentielle und parallele Algorithmen differenziert wird. Eine detaillierte Analyse verschiedenster Metaheuristiken geht damit einher. Nach Ansicht von GHIANI et al. ist die Literatur noch unstrukturiert. Mögliche zukünftige Forschungsaspekte könnten deshalb z. B. die Entwicklung von vorausschauenden Heuristiken, die Generierung von Metaheuristiken, die sich sowohl bei geringem und hohem Aufkommen dynamischer Kunden stabil verhalten, oder die Einbeziehung von dynamischen Fahrzeiten sein.

LACKNER (2003)²³⁵ wendet metaheuristische Optimierungsverfahren, speziell zwei Evolutionäre Strategien, einen Ameisenalgorithmus und das Simulated Annealing, auf das dynamische Tourenplanungsproblem an. Besonderes Ziel ist dabei die Analyse des Verhaltens

²²⁹ Vgl. Pankratz, G. (2002), S. 1 ff.

²³⁰ Vgl. Pankratz, G. (2002), S. 65.

²³¹ Vgl. Pankratz, G. (2002), S. 36.

²³² Vgl. Pankratz, G. (2002), S. 4.

²³³ Vgl. Ghiani, G. et al. (2003), S. 1 ff.

²³⁴ Vgl. Kapitel 3.1.

²³⁵ Vgl. Lackner, A. (2003), S. 1 ff.

dieser metaheuristischen Verfahren bei dynamischen Problemstellungen. Bei LACKNER erfolgt die Betrachtung eines kapazitätsrestriktiven dynamischen Tourenplanungsproblems mit Kundenzeitfenstern, bei dem nur die Anzahl der zu bedienenden Kunden dynamisch ist. Im Rahmen der von LACKNER durchgeführten Analysen findet zum einen die Variation des Anteils dynamischer Kunden an der Gesamtkundenanzahl sowie zum anderen die Variation der Ankunftsrate dynamischer Kunden pro Minute statt.

GIAGLIS et al. (2004)²³⁶ fokussieren ihren Artikel auf den Bereich des „Supply Chain Execution“²³⁷, insbesondere auf die Durchführung von Transport- und Lieferprozessen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Darstellung von aktuellen technologischen Entwicklungen, die eine real-time Distribution von Gütern begünstigen, sowie auf der Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus eines mobilen real-time Decision Support Systems für eine real-time Distribution. GIAGLIS et al. zeigen auf, wie vor allem technische Fortschritte im Bereich der mobilen und kabellosen Datenverarbeitung Bausteine von real-time Distributionsmanagement-Anwendungen werden. Ferner erfolgt die Darstellung des schematischen Ablaufs einer real-time Tourenplanung und der notwendigen technischen Komponenten vom Front-end über das Communication sub-system bis zum Back-end.²³⁸ Konkrete Kalkulationsalgorithmen zur Bestimmung von Tourenplänen sind nicht Gegenstand der Arbeit von GIAGLIS et al.

LARSEN et al. (2004)²³⁹ untersuchen das Traveling Salesman Problem mit Zeitfenstern, welches bereits von LARSEN 2001²⁴⁰ eingeführt wurde, für verschiedene Grade der Dynamik. Als Zielkriterium sollen Verspätungen bei der Erfüllung der Kundenaufträge minimiert werden. Des Weiteren erfolgt die Untersuchung der Auswirkungen der Wahl dieses Zielkriteriums auf die zurückgelegte Strecke des Fahrzeuges. Motiviert wird die Problemstellung sowie das verwendete Zielkriterium durch den Praxisanwendungsfall der Übernacht-Post- bzw. KEP-Dienste. LARSEN et al. schlagen als real-time Lösung eine Methode vor, bei der das Fahrzeug, sofern es leer ist bzw. keinen Auftrag hat, am letzten aktuellen Kunden warten soll bis ein neuer Kundenauftrag auftritt. Darauf aufbauend entwickeln Larsen et al. weitere veränderte Varianten dieser real-time Lösungsmethode, bei denen a priori Informationen über zukünftige dynamische Kundenaufträge Berücksichtigung finden. Infolge der zur Verfügung stehenden a priori Informationen werden verschiedene Repositionierungsstrategien für das auf neue Aufträge wartende Fahrzeug verfolgt. Die Repositionierungsstrategien sind bspw., dass das Fahrzeug den Wartepunkt aufsucht, der am nächsten zur aktuellen Fahrzeugposi-

²³⁶ Vgl. Giaglis, G. et al. (2004), S. 749 ff.

²³⁷ Vgl. Giaglis, G. et al. (2004), S. 749.

²³⁸ Vgl. Giaglis, G. et al. (2004), S. 758.

²³⁹ Vgl. Larsen, A. et al. (2004), S. 459 ff.

²⁴⁰ Vgl. Lackner, A. (2003), S. 1 ff.

tion gelegen ist, oder eine andere Variante beinhaltet, dass das Fahrzeug sich zum Wartepunkt in den Bereich des Einsatzgebietes begibt, wo die Wahrscheinlichkeit für den Auftritt neuer Kunden am größten ist. Die verschiedenen Varianten der Lösungsmethode werden sowohl an künstlich erzeugten Problemen sowie an Praxisdaten getestet. Dabei stellt sich heraus, dass alle Varianten signifikant zur Reduzierung von Verspätungen beitragen. Die Ergebnisse zeigen, dass die verfolgten Strategien nur eine geringe Erhöhung der gefahrenen Strecke zur Folge haben. Die Basisvariante der real-time Lösungsmethode erzielt vor allem bei der Gleichgewichtung der Zielkriterien Reduzierung der Verspätungen und Minimierung der Gesamtfahrstrecke die besten Ergebnisse, während die Weiterentwicklungen der Basisvariante bei einer Übergewichtung des Kriteriums Reduzierung der Verspätungen nach LARSEN et al. zu empfehlen sind.

Yang et al. (2004)²⁴¹ führen das “Real-time multivehicle truckload pickup and delivery problem (TPDP)” ein. Hierbei handelt es sich um ein Komplettladungsproblem, d. h. jedes Fahrzeug kann aufgrund der Komplettladungen jeweils immer nur einen Kundenauftrag transportieren. Die zukünftigen zu bedienenden Kundenaufträge sind unsicher und treten kontinuierlich auf. Zur Beschreibung der statischen Teilprobleme des dynamischen Gesamtproblems, der sogenannten offline Version des Problems, wird eine mixed-integer programming Formulierung verwendet. Für die Lösung des dynamischen Gesamtproblems betrachten und vergleichen Yang et al. (2004) fünf Strategien, die auf einem rollierenden Planungshorizont basieren. Bei zwei dieser Strategien erfolgt die wiederholte Reoptimierung der Instanzen von statischen Teilproblemen. Die anderen Strategien nutzen einfachere lokale heuristische Regeln zur Integration neuer dynamischer Kunden in den bestehenden Tourenplan. Eine der Lösungspolitiken ist neu, die anderen wurden auch in Regan et al. (1998)²⁴² und Yang et al. (1998)²⁴³ veröffentlicht. Anhand von Yang et al. durchgeführter Simulationen erfolgt der Vergleich der fünf Strategien. Dabei werden einige Parameter, wie Verkehrsaufkommen, unterschiedlicher Grad bzgl. des Vorhandenseins zukünftiger Informationen oder variierender Grad der Flexibilität der Abweisung von Aufträgen, variiert und analysiert.

SANDVOß (2004)²⁴⁴ befasst sich mit dynamisch schwankenden Fahrzeiten in städtischen Gebieten als dynamische Planungssituation im Gegensatz zu der in dieser Arbeit betrachteten dynamischen Planungssituation den während des Planungshorizontes laufend eintreffenden Kundenaufträgen. Die zunehmende Verfügbarkeit von Online-Verkehrsinformationen aufgrund moderner Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglicht die Lösung

²⁴¹ Vgl. Yang, J. et al. (2004), S. 135 ff.

²⁴² Vgl. Regan, A. et al. (1998), S. 176 ff.

²⁴³ Vgl. Yang, J. et al. (1998), S. 107 ff.

²⁴⁴ Vgl. Sandvoß, E. (2004), S. 1 ff.

dieses Planungsproblems. Bei dem in der Arbeit von SANDVOß zugrundeliegenden Tourenplanungsproblem handelt es sich neben der Beachtung von dynamisch schwankenden Fahrzeiten um ein Pick-up-and-delivery-Problem, bei dem ein Fahrzeug nur einen Auftrag transportieren kann. Infolgedessen müssen Kapazitätsrestriktionen der Fahrzeuge nicht beachtet werden.²⁴⁵ Zur Lösung der Problemstellung ist die Kalkulation von dynamischen kürzesten Wegen notwendig.²⁴⁶

Abschließend erfolgt in Tabelle 3-2 eine Auswertung der quantitativ-orientierten Arbeiten des Literaturüberblicks nach den Kriterien betrachtete Problemstellung, Inputdaten, die als dynamisch in den Planungsalgorithmus eingehen, und verwendetes Lösungsverfahren. Zu dem in diesem Kapitel präsentierten Literaturüberblick ist zu ergänzen, dass die Veröffentlichungen von POWELL et al., LARSEN, LACKNER, PANKRATZ sowie SANDVOß die bis jetzt umfangreichsten Arbeiten zur dynamischen Tourenplanung sind, wobei PANKRATZ und SANDVOß ein Pick-up-and-delivery-Problem betrachten. Deutschsprachige Veröffentlichungen zum kapazitierten dynamischen Tourenplanungsproblem (DVRP) wurden während des umfangreichen Literaturstudiums nicht offenbar, außer der Arbeit von LACKNER, die zugleich die neueste Quelle in diesem Bereich, die im Rahmen des Literaturstudiums gefunden wurde, darstellt. Themenverwandte deutschsprachige Arbeiten enthalten kaum Verweise auf Veröffentlichungen zur dynamischen Tourenplanung.²⁴⁷ Es zeigt sich, dass offensichtlich noch akuter Forschungsbedarf im Bereich dynamischer Tourenplanung besteht.

²⁴⁵ Vgl. hierzu auch Fleischmann, B. et al. (2004b), S. 421.

²⁴⁶ Vgl. Fleischmann, B. et al. (2004b), S. 424 f.

²⁴⁷ GIETZ (1994) führt beispielsweise zur stochastischen Tourenplanung lediglich 4 Quellen, zur dynamischen Tourenplanung gar keine an. Vgl. Gietz, M. (1994), S. 18. VOGT (1998) gibt ebenfalls nur 4 Quellen zur stochastischen Tourenplanung und 4 Quellen zur dynamischen Tourenplanung an, Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002) nennen eine Quelle und DOMSCHKE geben eine Quelle zur dynamischen und 7 Quellen zur stochastischen Tourenplanung an. Selbst Lackner weist nur ca. 10 Quellen zur dynamischen Tourenplanung in seiner Arbeit aus. Vgl. Vogt, M. (1998), S. 51, Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A3-54. und Domschke, W. (1997), S. 256 f.

Werk	Problemstellung	Inputdaten, die als dynamische Größe in die Planung einfließen	Lösungsalgorithmus	Anwendungsgebiet
BELL et al. (1983)	VRP: Auslieferung eines homogenen Gutes von einem Depot an mehrere Endkunden	Liefermenge dynamisch; Kundenaufträge des aktuellen Tages statisch, nur Kundenaufträge der folgenden Tage unsicher	zweistufiges Verfahren: 1. Bildung potentieller Touren 2. Auswahl der zu fahrenden Touren durch Lösung eines MIP-Modells	Auslieferung von Industriegasen
PSARAFTIS (1988)	Zuordnung von dynamischen Frachtaufträgen zu Schiffen	dynamische Kundenaufträge	MORSS (spezieller Algorithmus): Lösung von Zuordnungsproblemen bei einem „rollierenden“ Planungshorizont	Disposition in der Seeschifffahrt
BERTSIMAS und VAN RYZIN (1991)	DTRP ²⁴⁸ (nichtkapazitiertes Problem), Kombination von Warteschlangentheorie und Rundreisplanung	dynamische Kundenaufträge ohne Liefermengen	verschiedene Heuristiken (Strategien), die die Systemzeit der Kunden (Wartezeit bis zum Eintreffen des Monteurs + Reparaturzeit(Standzeit) beim Kunden) minimieren	Durchführung von Monteurstouren
POWELL et al. (1995)	Dynamic Traffic Assignment Problem: Transport von Komplettladungen (ohne zwischenzeitliches Aufsuchen des Depots)	dynamische Kundenaufträge	Lösung von Netzwerkflussproblem mit zeitabhängigen Kapazitäten	dynamisches Flottenmanagement
LUND et al. (1996)	DVRP	dynamische Kundenaufträge	Einfügeheuristik	Einsammeln von Gütern
GENDREAU et al. (1999) und ICHOUA et al. (2000)	nichtkapazitiertes DVRP	dynamische Kundenaufträge	Metaheuristik: adaptiver Tabu Search Ansatz	KEP-Dienstleistungen
ICHOUA, GENDREAU und POTVIN (2003) ²⁴⁹	nichtkapazitiertes DVRP	dynamische Kundenaufträge und tageszeitabhängige Fahrzeiten	Metaheuristik: Tabu Search Algorithmus	KEP-Dienstleistungen
LARSEN (2001)	PDTRP und DVRP	dynamische Kundenaufträge	PDTRP: wie bei BERTSIMAS und VAN RYZIN (1991) verschiedene Heuristiken (Strategien), die die Systemzeit der Kunden minimieren; DVRP: Einfügeheuristik (Weiterentwicklung des Verfahrens von LUND et al. (1996))	Monteurstouren; Einsammeln von Gütern

²⁴⁸ BERTSIMAS/ SIMCHI-LEVI (1996) und POWELL et al. (1995) beschäftigen sich ebenfalls mit dem DTRP. Vgl. Bertsimas, D./ Simchi-Levi, D. (1996), S. 286 ff. und Powell et al. (1995), S. 146 ff.

²⁴⁹ Da die Arbeit von ICHOUA, GENDREAU und POTVIN (2003) auf den Arbeiten von GENDREAU et al. (1999) und ICHOUA et al. (2000) aufbaut, wird sie entgegen der chronologischen Reihenfolge bereits hier aufgeführt.

Werk	Problemstellung	Inputdaten, die als dynamische Größe in die Planung einfließen	Lösungsalgorithmus	Anwendungsgebiet
PANKRATZ (2002)	Pick-up-and-delivery-Problem für den speditionellen Fernverkehr (Dynamisches speditionelles Dispositionsproblem mit Fremdvergabe (DSDPFV))	dynamische Kundenaufträge	Metaheuristik: Genetischer Algorithmus	Tourenplanung im speditionellen Fernverkehr
LACKNER (2003)	kapazitiertes dynamisches Tourenplanungsproblem mit Kundenzeitfenstern	dynamische Kundenaufträge	verschiedene Metaheuristiken: z. B. Ameisenalgorithmus und Simulated Annealing	dynamische Tourenplanung allgemein
LARSEN et al. (2004)	DTSPW	dynamische Kundenaufträge	3-opt Verfahren von LIN (1965) ²⁵⁰ , Initialisierung des Verfahrens durch aufsteigende Sortierung der Zeitfensteruntergrenzen der Kunden; verschiedene Positionierungsstrategien für auf Aufträge wartende Fahrzeuge	Übernacht-Post- bzw. KEP-Dienste
YANG et al. (2004)	Truckload Pick-up-and-delivery-Problem	dynamische Kundenaufträge	mixed-integer programming Formulierung des offline-Problems; Lösung durch einfachere und gehobene lokale Einfügeheuristiken	dynamischer Komplett-ladungsverkehr allgemein
SANDVOß (2004)	Pick-up-and-delivery-Problem, Transport von nur einem Auftrag je Fahrzeug, kein kapazitiertes Tourenplanungsproblem	dynamische Fahrzeiten	Einfügeheuristik und Lösung von Zuordnungsproblemen	Routen- und Tourenplanung in Ballungsgebieten, bspw. Kurierdienste und Dial-a-ride-Systeme

Tab. 3-2: Überblick bzgl. der Arbeiten zur dynamischen Tourplanung

²⁵⁰ Vgl. Lin, S. (1965), S. 2245 ff.

3.3 Anwendungsgebiete

Aufgrund der in den letzten Jahren veränderten Rahmenbedingungen antizipieren deterministisch statische Modelle²⁵¹ bei vielen Anwendungen die zugrundeliegenden Strukturen nicht in ausreichendem Maße und erbringen somit auch nicht die nötige Güte bei der Steuerung der Distributionssysteme. Der Wandel der Rahmenbedingungen spiegelt sich beispielsweise darin wider, dass einige Autoren eine Erweiterung der Zielfunktion bei der Optimierung vorschlagen. Neben dem klassischen Kriterium der Minimierung der Tourlänge soll auch die Minimierung der Lieferzeit oder Bedienzeit (Reaktionszeit) erfolgen.²⁵² Diese Entwicklung kann durch folgende Thesen unterstützt werden.²⁵³

- Im Wettbewerb konkurrieren die Unternehmen stärker in Bezug auf kurze Lieferzeiten (hoher Servicegrad) als auf Basis geringer Transportkosten. Vor allem gegenüber dem Kunden sind kürzere Lieferzeiten wichtiger als die Minimierung der Kosten.
- Die Lagerkosten dominieren die Transportkosten in einigen Anwendungsfällen. Hier ist eine schnelle Auffüllung des Lagers von Nöten, da zur Verringerung der Kapitalbindung nur geringe Bestände gehalten werden.
- Für Unternehmen sind geringe Lagerbestände oder die Vermeidung von Lagerbeständen (Just-in-time - Politik) und dementsprechend eine minimale Lieferzeit von großer Bedeutung.²⁵⁴
- Viele Kostenarten, wie Lohnkosten, Gebäudekosten, Betriebskosten usw., sind meist fix, so dass eine Minimierung der Transportkosten nur einen marginalen Effekt hätte.

Anwendungsgebiete der dynamischen Tourenplanung, die in der einschlägigen Literatur des Öfteren genannt werden, sind:²⁵⁵

I. Dynamisches Flottenmanagement – "Dynamic fleet management"

Bei Fernverkehrsspeditionen, bei der Beförderung von Sammelgutsendungen oder bei anderen großvolumigen Fahrzeugen, bei denen Ladungen mehrerer Versender oder Empfänger sich auf einem LKW befinden, liegt des Öfteren eine dynamische Planungssituation vor.

²⁵¹ Bei deterministisch statischen Modellen sind alle Inputdaten bekannt (vollkommene Sicherheit) und sie ändern sich im Zeitablauf nicht. Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A3-53.

²⁵² Vgl. z. B. Bertsimas, D./ Simchi-Levi, D. (1996), S. 298, Psaraftis, H. (1988), S. 225 ff. und Larsen, A. (2001), S. 8 ff. In Kapitel 4 werden daher die neu konzipierten Verfahren dahingehend untersucht, inwieweit sie der Minimierung der Wartezeit der Kunden gerecht werden.

²⁵³ Vgl. Bertsimas, D./ Simchi-Levi, D. (1996), S. 298.

²⁵⁴ URBAN (2004) befasst sich beispielsweise mit der Just-in-time-Belieferung unter Beachtung von dynamischen Aspekten. Vgl. Urban, K.-P. (2004), S.52 ff.

²⁵⁵ Vgl. Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (1998), S. 120 ff., Ghiani, G. et al. (2003), S. 2, Larsen, A. (2001), S. 15 ff. und Psaraftis, H. (1995), S. 146 f.

Aufgrund der langen Fahrzeiten sind nicht alle Aufträge der Kunden im Voraus bekannt und müssen daher "real-time" den Fahrzeugen zugeordnet werden.

II. Lieferantengesteuerte Lagersysteme – "Vendor-managed distribution systems"²⁵⁶

Hierzu gehört beispielsweise die Auslieferung von Heizöl oder Industriegasen. LARSEN beschreibt, dass die Öllieferanten (Brennstoffhändler) die Tagestemperaturen in der kälteren Jahreszeit zur Schätzung der Verbrauchsmenge an Öl benutzen und so errechnen können, wann der Tank eines Kunden aufgefüllt werden muss.²⁵⁷ Da es sich hierbei nur um Richtwerte handelt, verbleiben erfahrungsgemäß trotzdem ca. 20 % dynamische Kunden, deren Lager (Tank) aufgrund von Verbrauchsschwankungen unerwartet leer wird. Diese Kunden rufen tagsüber an und wünschen eine Lieferung noch am gleichen Tag.

III. KEP-Dienste – „Courier Mail Services“

Kurier-, Express- und Paketdienstleister haben ebenfalls einen beträchtlichen Anteil an dynamischen Kunden. Diese Problemstellung tritt nach GHIANI et al. und LARSEN vor allem bei Fernpostsendungen auf, bei denen die Zuläufe erst in einem Hub gebündelt werden, bevor sie gemeinsam im Hauptlauf befördert werden. Sind die Transporter zum Einsammeln der Paket- oder Briefsendungen unterwegs, gehen in der Dispositionszentrale noch weitere dynamische Abholaufträge ein, die auf die Fahrzeuge verteilt werden müssen. Die Zustellungen sind im Gegensatz dazu ein statisches Problem.

IV. Pannen- und Reparaturdienste – "Rescue and repair service companies"

Bei Pannen- und Reparaturdiensten kann in Abhängigkeit von der Art der Dienstleistung eine mehr oder weniger dynamische Problemstellung vorliegen, z. B. sind bei Pannenhilfsdiensten wie dem "ADAC" alle Kunden dynamisch im Gegensatz zu einem Elektromonteur, bei dem ein großer Teil der Kunden bereits bis zum Vortag bekannt ist und nur wenige dringende Notfälle dynamischen Charakter haben.

V. Personenbeförderungsdienste, Alten- und Behindertenfahrerservice – "Dial-A-Ride Systeme"

Liegt der Aufnahme- und Abgabeort eines Gutes oder einer Person innerhalb einer Tour, handelt es sich um ein Pick-up-and-delivery-Problem. Dial-a-ride-Systeme, wie der Transport von älteren, behinderten oder kranken Personen, gehören hierzu. Auch hier kann der Transport ein oder mehrere Tage zuvor feststehen (statische Kunden) oder aber erst am gleichen Tag gebucht werden (dynamische Kunden).

²⁵⁶ Vgl. zu Vendor-managed distribution systems auch Schmidthöfer, A. (2004), S. 23.

²⁵⁷ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 16.

VI. Notrufdienste – "Emergency services"

Bei Notruf- oder Rettungsdiensten sind ausnahmslos alle Kunden dynamisch. Grundsätzlich erfolgt hier keine Routenbildung, da ein Notfall i. d. R. erledigt wird, bevor ein neuer auftritt. Vielmehr erörtert die Wissenschaft das Thema aus Sicht der Warteschlangentheorie, um beispielsweise die Anzahl von Personal und Technik zu bestimmen, oder aber aus Sicht der Standorttheorie, zur Bestimmung geeigneter Depots.

VII. Taxiunternehmen – "Taxi cab services"

Die Kundschaft von Taxiunternehmen ist ebenfalls fast nur dynamisch. Auch hier müssen Standplätze für die Taxis bestimmt werden, an denen sie auf neue Fahrgäste warten, wenn momentan kein Auftrag vorliegt, oder von denen sie schnellstmöglich einen Kundenabholort erreichen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich primär mit den Anwendungsbereichen I. bis IV. Anzumerken ist, dass grundsätzlich jede Transportaufgabe, bei der während der Ausführung der Auslieferung oder Abholung von Gütern noch neue Aufträge hinzukommen, dynamisch ist, d. h. die Relevanz der dynamischen Tourenplanung ist bei jedem Unternehmen, das Transportleistungen durchführt oder koordiniert, theoretisch gegeben.

3.4 Lösungskonzepte für dynamische Problemstellungen

In diesem Kapitel sollen verschiedenste Ansätze aus der Literatur zur Lösung dynamischer Rundreise- und Tourenplanungsprobleme vorgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Planung auf Grundlage von dynamischen Informationen, die von der Zeit abhängen, erfolgt. D. h. die Bekanntgabe der Daten findet im Zeitablauf statt oder Angaben werden aktualisiert. Für Lösungskonzepte bedeutet dies, dass ein Ergebnis bei gleichzeitig fortschreitender Zeit parallel zum Eintreffen neuer Informationen gefunden werden muss. Das Ergebnis einer a priori Lösung ist i. d. R. nicht für das Gesamtproblem optimal, da auf die während der Tourausführung eintreffenden neuen Informationen keine angemessene Reaktion mehr möglich ist. Es kann im Vorhinein lediglich eine Strategie oder Politik bestimmt werden, die spezifiziert, welche Aktionen bei bestimmten Zuständen oder Ereignissen des Systems durchzuführen sind.²⁵⁸

Prinzipiell wird im Rahmen dieses Kapitels eine Unterscheidung in sogenannte a priori Methoden, die eine Lösung vor Tourstart generieren, und in Verfahren, die parallel zur Ausfüh-

²⁵⁸Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 3.

rung der Touren bei Veränderung der Datenbasis oder bei Eintritt bestimmter Ereignisse eine neue Lösung erzeugen (real-time Methoden), vorgenommen. Kapitel 3.4.1 behandelt zunächst die a priori Methoden, bei denen das Konzept der Rahmentouren, das Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP) und das Probabilistic Vehicle Routing Problem (PVRP) vorgestellt werden. Obwohl, wie bereits erwähnt, a priori Lösungen im dynamischen Kontext eher schlecht abschneiden, soll trotzdem eine Präsentation einiger ausgewählter Konzepte erfolgen, da sie dann von Interesse sind, wenn beispielsweise nur begrenzte Rechentechnik bzw. -leistung zur Verfügung steht,²⁵⁹ und nicht zuletzt bilden sie ein Element in der Entwicklungsgeschichte der Verfahren. Kapitel 3.4.2 stellt sogenannte real-time Methoden vor, wobei sich in der Literatur zwei Gruppen abzeichnen. Die erste Gruppe sind Arbeiten zur Bildung von Teilproblemen und die zweite Gruppe Arbeiten zur Lösung von Teilproblemen.²⁶⁰ Veröffentlichungen der ersten Gruppe befassen sich mit der Analyse und Generierung von Strategien, die ein dynamisches Gesamtproblem in einzelne Teil- bzw. Unterprobleme aufspalten. So erfolgt unter anderem die Analyse, wie mit neuen Elementen, beispielsweise einem dynamischen Kunden, zu verfahren ist. Dabei kann festgelegt werden, ob eine Bearbeitung dieser sofort erfolgt oder eine räumliche, mengenmäßige oder zeitliche Gruppierung stattfindet. Den Verfahren in den Arbeiten zur Bildung von Teilproblemen liegt die Annahme zugrunde, dass jedes Unterproblem für sich optimal gelöst wird. Deshalb ist die Erforschung von Algorithmen zur Lösung dieser Unterprobleme nicht Thematik dieser Arbeiten. Die Veröffentlichungen zur Lösung von Teilproblemen haben die Konzeption und Erforschung von Algorithmen zur Lösung von Teilproblemen im dynamischen Prozess zum Ziel. Hierbei wird nun von einer fixierten Strategie ausgegangen und der Forschungsschwerpunkt liegt auf den Algorithmen zur Lösung der Teilprobleme. Es kann z. B. angenommen werden, dass ein solches Teilproblem immer dann vorliegt, wenn ein neuer Kunde erscheint. Das Teilproblem für sich ist statisch, da im Moment des Planungszeitpunktes die um den zusätzlichen Kunden erweiterte Kundenmenge als fix angenommen wird.

²⁵⁹ Es ist davon auszugehen, dass begrenzte Rechentechnik oder -leistung heutzutage keine Beschränkung mehr darstellt, wenn Heuristiken zum Einsatz kommen. Sollen hingegen exakte Verfahren genutzt werden, kann auch heute noch die Rechenleistung eine Beschränkung darstellen. Dementsprechend ist die Anwendung von exakten Verfahren bei der Bildung einer a priori Tour eher möglich als bei der dynamischen Tourenplanung. Ferner können die dynamische Tourenplanung begleitende Prozesse, wie Datenaufnahme von dynamischen Kunden und real-time Planungsergebnisübermittlung an die Fahrzeuge, technisch aufwändige bzw. kostspielige Tätigkeiten sein, so dass eine weniger aufwändige a priori Methode Anwendung findet.

²⁶⁰ Bianchi (2000) nennt die erste Gruppe Strategisch-orientierte Arbeiten und die zweite Gruppe Heuristisch-orientierte Arbeiten. Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 5 ff. Diese Bezeichnung wird hier nicht verwendet, da es sich bei den Lösungsverfahren der Strategisch-orientierten Arbeiten ebenfalls um heuristische Vorgehensweisen handelt.

3.4.1 A priori Methoden

Eine Möglichkeit zur Lösung des dynamischen Tourenplanungsproblems ist die Anwendung des **Rahmentourenkonzeptes**.²⁶¹ Hierbei erfolgt die Generierung von sogenannten Rahmentouren oder Tourgebieten. Alle Kunden werden zwecks einer mittelfristigen Planung einer Rahmentour mit optimaler Anfahrtsreihenfolge bzw. einem Tourgebiet zugeordnet. Diese Touren werden dann täglich an die aktuellen Bedürfnisse angepasst, d. h. Kunden, die einen Bedarf haben, werden angefahren, die anderen entfallen. So ist es möglich, kurzfristig auf aktuelle Gegebenheiten zu reagieren. Die Besuchsreihenfolge der Kunden bleibt allerdings erhalten. Das Problem bei fixen Rahmentouren ist die geringe Kapazitätsauslastung. Die täglich oft schwankenden Tourlasten werden so geplant, dass die physischen und zeitlichen Restriktionen kaum überschritten werden, was allerdings nur zu einer durchschnittlichen Kapazitätsauslastung von 70-80 % führt.²⁶² Wird hingegen eine tägliche oder sogar eine mehrmals tägliche Tourenplanung benutzt, so lassen sich die Fuhrparkkapazitäten im Durchschnitt um 10-20 % höher auslasten.²⁶³

Wie bereits herausgestellt, sind viele Daten mit Unsicherheit behaftet und im Voraus nicht bekannt. Erfolgt bei einer Problemstellung die Beachtung von stochastischen Elementen, z. B. unsichere Fahrzeiten, unbekannte Bedarfsmengen oder Unsicherheit bezüglich des Auftretens der Kunden, wird vom Stochastischen Tourenplanungsproblem (Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP)) gesprochen.²⁶⁴ Im Folgenden werden zwei spezielle Varianten des SVRP vorgestellt, bei denen nur das Auftreten der Kunden selbst stochastisch ist (alle anderen Daten sind deterministisch). Hierbei handelt es sich um das Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP) und das Probabilistic Vehicle Routing Problem (PVRP), die auf JAILLET und ODONI²⁶⁵ zurückgehen. Bei den Modellen von JAILLET und ODONI erfolgt genauso wie beim Rahmentourkonzept die Planung im Vorhinein, d. h. die Planungsergebnisse gelten für einen längeren Zeitraum. Auf das Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP) wird im Folgenden ausführlicher eingegangen als auf das PVRP, da es deutlich stärker erforscht ist als das PVRP.²⁶⁶ Daher erfolgt zunächst die Betrachtung des PTSP.

Beim **Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP)** wird a priori eine Rundreise ermittelt. Die Reihenfolge der Kunden innerhalb dieser Rundreise bleibt jeden Tag gleich. Zu

²⁶¹ Vgl. Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002), S. A3-55, Fleischmann, B. (1998), S. 288 und Vahrenkamp, R. (2003), S. 236.

²⁶² Vgl. Diruf, G. (1990), S. 10 f.

²⁶³ Vgl. Diruf, G. (1990), S. 11.

²⁶⁴ Gendreau, M. et al. (1996) geben einen guten Überblick bezüglich des Stochastic Vehicle Routing Problems. Vgl. Gendreau, M. et al. (1996), S. 3 ff.

²⁶⁵ Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 293 ff. und Jaillet, P. (1985), S. 1 ff.

²⁶⁶ Vgl. zum PTSP auch Bianchi, L. et al. (2005), S. 206 ff. und Bertsimas, D./ Howell, L. (1993), S. 68 ff.

Beginn eines jeden Tages erfolgt lediglich die Eliminierung der Kunden, die an diesem Tag nicht aufgetreten sind. Abbildung 3-3 veranschaulicht dieses Vorgehen. Auf der linken Seite ist die a priori Tour zu sehen und auf der rechten Seite die tatsächlich gefahrene Route für einen beliebigen Tag nach Bekanntwerden, welche Kunden zu bedienen sind.

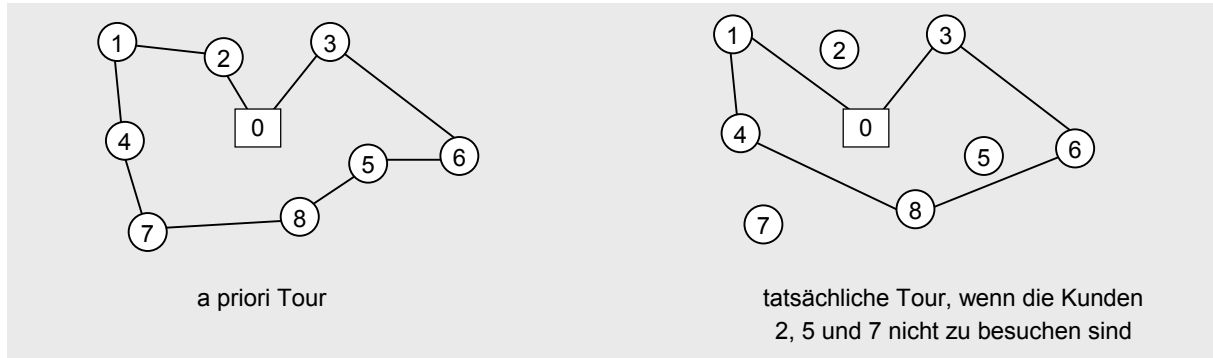


Abb. 3-3: PTSP-Methode

Bei diesem Ansatz von JAILLET und ODoni wird, im Gegensatz zum Rahmentourkonzept, versucht, das tatsächliche tägliche Auftreten der Kunden über die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeiten im Voraus zu antizipieren und dadurch a priori eine im Mittel relativ gute Tour zu bestimmen.²⁶⁷ Das Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP) und das Probabilistic Vehicle Routing Problem (PVRP) sind beide auf einem bewerteten Graphen $G=(V,E,c)$, mit $V=\{0,1,\dots,n\}$ definiert, bei dem jeder Knoten $i \in V$ (Kunde i) eine Wahrscheinlichkeit p_i für sein Auftreten besitzt (Der Knoten 0 ist das Depot. I. d. R. gilt: $p_0 = 1$, $p_i < 1$ für $i \in V \setminus \{0\}$). Jede Kante des Graphen G ist mit c_{ij} bewertet (z. B. Kosten oder Entfernung). Ferner existiert die Zufallsvariable Z , die Teilmengen von $V \setminus \{0\}$ als Realisation z annehmen kann. Die Menge z gibt somit die aktuell tatsächlich auftretenden Kunden an. Ist $p_i = p_j$ für alle $i \neq j$ und k der $n+1$ Knoten ($|z|=k$; $0 \leq k \leq n+1$) sind aufgetreten, dann gilt:

$$P(Z=z) = p^k \cdot (1-p)^{(n+1)-k} \quad (3.1)$$

Im allgemeinen Fall ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $P(Z=z)$ durch:

$$P(Z=z) = \prod_{i \in z} p_i \cdot \prod_{j \in V \setminus z} (1-p_j) \quad (3.2)$$

Prinzipiell wird das Ziel verfolgt, die erwartete Tourlänge $E[L(Z)]$ zu minimieren. Die erwartete Tourlänge $E[L_T(Z)]$ einer Tour T beim PTSP ergibt sich als gewichteter Durchschnitt über alle Teilprobleme aus:

$$E[L_T(Z)] = \sum_{s \subseteq V} L_T(s) \cdot P(Z=s) \quad (3.3)$$

²⁶⁷ Die folgenden Ausführungen und Formeln zum PTSP und PVRP entstammen alle der Arbeit von Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 293 ff.

$L_T(z)$ ist die jeweilige Tourlänge, die sich zur zugehörigen Realisation s ermitteln lässt. Die a priori Tour T , die durch alle $n+1$ Knoten führt, hat folgende Gestalt: $T = [0, 1, 2, \dots, n, 0]$.

Eine effizientere Variante, die sich vor allem für Implementierungen eignet, stellt folgende Formel dar:²⁶⁸

$$E[L_T(Z)] = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \alpha_{ij} c_{ij} \quad (3.4)$$

$$\text{mit } \alpha_{ii} = 0 \quad \forall i \in V$$

$$\alpha_{i,i+1} = p_i p_{i+1} \quad \forall i \in V$$

$$\alpha_{ij} = p_i p_j \left(\prod_{k=i+1}^{j-1} (1 - p_k) \right) \quad \forall i, j \in V \quad ^{269}$$

$$\text{Die erwartete Anzahl der Kunden } E[Z] \text{ ist } E[Z] = \sum_{i=0}^n p_i. \quad (3.5)$$

Im Folgenden werden drei heuristische Verfahren zur Lösung des PTSP präsentiert.²⁷⁰ Dabei handelt es sich um eine aus der Literatur bekannte Heuristik, das Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger (Probabilistic Nearest Neighbour (PNN)), und zwei im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Verfahren, das Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Probabilistic Gradual Add (PGA)) und das Verfahren Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Modified Probabilistic Gradual Add (MPGA)). Da nur die alleinige Existenz des Verfahrens Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger sowie dessen Performance als unbefriedigend erschien, wurden zwei weitere Verfahren (Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Probabilistic Gradual Add (PGA)) und Verfahren Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Modified Probabilistic Gradual Add (MPGA))) zur Lösung des PTSP entwickelt. Bei durchgeführten Tests während der Entwicklung der Verfahren zeigte sich, dass es von großem Vorteil ist, solche Kunden zuerst in die Tour einzubinden, welche sehr weit vom Ausgangspunkt (Depot) entfernt liegen.²⁷¹ Da im deterministischen Fall das Verfahren Sukzessive Einbeziehung²⁷² diese Forderung bedingt erfüllt, erfolgte dessen Modifikation für die Anwendung auf das PTSP. Da die Ausgangsforderung, weit vom Depot entfernt liegende Knoten sehr früh in die Tour einzubinden, mit dem Verfahren Wahrscheinlich-

²⁶⁸ Bei Anwendung von (3.4) ist zu beachten, dass i und j die Position des betreffenden Knotens in der Tour T bezeichnen. Infolgedessen steht das Depot an Position 0 und $n+1$.

²⁶⁹ Es muss aufgrund der unterstellten a priori Tour T gelten: $i < j$.

²⁷⁰ Laporte, G. et al. (1994) geben ein exaktes Verfahren zur Lösung des PTSP an. Allerdings können nur Problemgrößen mit bis zu 50 Knoten optimal gelöst werden. Vgl. Laporte, G. et al. (1994), S. 543 ff.

²⁷¹ Vgl. Wels, A./ Richter, A. (2005), S. 409.

²⁷² Vgl. Domschke, W. (1997), S. 111.

keitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Probabilistic Gradual Add (PGA)) noch nicht vollständig umgesetzt werden kann, wurde des Weiteren das Verfahren Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Modified Probabilistic Gradual Add (MPGA)) entwickelt.²⁷³

Im Folgenden werden die Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger (Probabilistic Nearest Neighbour (PNN)), Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Probabilistic Gradual Add (PGA)) und Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Modified Probabilistic Gradual Add (MPGA)) vorgestellt. Da innerhalb der Algorithmenpräsentation zwecks der Übersichtlichkeit die Vereinfachung der Notation erfolgt, wird auf die Angabe der Zufallsgröße Z verzichtet. Die Abhängigkeit ist trotzdem zu beachten.

Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger:²⁷⁴

Start: Bestimme Startknoten (Depot) $v_0 = 0$, mit $p_{v_0} = 1$.

Iteration $j (=1, 2, \dots, n)$: Suche den (bei Gleichheit einen beliebigen) Knoten $v_j \in V_{n-k}$ der folgende Gleichung minimiert:²⁷⁵

$$E[L_{v_j}] = \sum_{r=0}^{k-1} p_{v_r} p_{v_j} \prod_{s=r+1}^k (1 - p_{v_s}) c_{v_r v_j} + p_{v_k} p_{v_j} c_{v_k v_j} \quad (3.6)$$

Dabei gilt: k ist die Anzahl der Knoten (Kunden), die bereits in die Tour integriert wurden ($k = j-1$).

V_{n-k} ist die Menge der noch nicht ausgewählten Knoten (Kunden), d. h. aus denen wird v_j ausgewählt.

Ergebnis: Rundreise $R = [v_0, v_1, \dots, v_n, v_0]$ mit erwarteter Länge $E[L_R]$ liegt vor.²⁷⁶

Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung:²⁷⁷

Start: Bestimme Startknoten (Depot) $v_0=0$ (mit $p_{v_0} = 1$) und ermittle Knoten v_1 mit

$$c_{v_0 v_1} = \max \{c_{v_0 i} \mid i \neq v_0\}. \quad (3.7)$$

Bilde Kurzzundreise $K = [v_0, v_1, v_0]$ mit erwarteter Länge $E[L_K]$.²⁷⁸

²⁷³ Vgl. Wels, A./ Richter, A. (2005), S. 410.

²⁷⁴ JAILLET/ ODONI (1988) geben den Algorithmus für identische Wahrscheinlichkeiten an. Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 311.

²⁷⁵ (3.6) gibt die zu der bis jetzt gebildeten Tour hinzukommende erwartete Länge an.

²⁷⁶ $E[L_R]$ wird nach Formel (3.3) bestimmt.

²⁷⁷ Vgl. Wels, A./ Richter, A. (2005), S. 409 f.

²⁷⁸ $E[L_K]$ wird nach Formel (3.3) bestimmt.

Iteration $j (=2,3,\dots,n)$: Bestimme Knoten $k \notin K$ und $v_k \in K$ so, dass

$$c_{v_k k} = \max_{l \notin K} \min_{v_h \in K} c_{v_h l} \quad (3.8)$$

sowie eine Kante $[v_m, v_{m+1}]$ auf K mit

$$E[L_{K_{v_m, k, v_{m+1}}}] = \min\{E[L_{K_{i_h, k, i_{h+1}}}] | h = 1, \dots, j-1\}^{279} \quad (3.9)$$

und füge den Knoten k zwischen v_m und v_{m+1} ein.²⁸⁰

Ergebnis: Rundreise $R = [v_0, v_1, v_2, \dots, v_n, v_0]$ mit erwarteter Länge $E[L_R]$ liegt vor.

Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung.²⁸¹

Start: Bestimme Startknoten (Depot) $v_0 = 0$, mit $p_{v_0} = 1$.

Bestimme die Entfernungen $c_{v_0 v_i}$ aller Kunden ($i \in V \setminus \{0\}$).

Ordne diese Entfernungen der Größe nach absteigend in einer Liste.

Iteration $j (=1,2,\dots,n)$: Wähle die Kunden k der Reihe nach aus der Liste aus und bestimme jeweils eine Kante $[v_m, v_{m+1}]$ auf K mit

$$E[L_{K_{v_m, k, v_{m+1}}}] = \min\{E[L_{K_{i_h, k, i_{h+1}}}] | h = 1, \dots, j-1\}^{282} \quad (3.10)$$

und füge den Knoten k zwischen v_m und v_{m+1} ein.

Ergebnis: Rundreise $R = [v_0, v_1, v_2, \dots, v_n, v_0]$ mit erwarteter Länge $E[L_R]$ liegt vor.

Bei numerischen Tests, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, zeigte sich, dass die zwei neuen Verfahren deutlich bessere Ergebnisse erzielen als das Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger. Der Vergleich der Verfahren erfolgte anhand des Kriteriums durchschnittliche Tourlänge je Testlauf. Die Tabelle 3-3 stellt die Ergebnisse des Vergleichs der Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger (Probabilistic Nearest Neighbour (PNN)), Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Probabilistic Gradual Add (PGA)) und Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Modified Probabilistic Gradual Add (MPGA)) dar. Dabei wurden auch die deterministische Variante der Verfahren mit in die Tests einbezogen (Bester Nachfolger (Nearest Neighbour (NN)), Sukzessive Einbeziehung (SE) und Modifizierte Sukzessive Einbeziehung (EWE)). Ein Testlauf umfasst 100 Beispiele. Die Ermittlung der Testergebnisse erfolgte für

²⁷⁹ Wird nach Formel (3.3) bestimmt.

²⁸⁰ $E[L_{K_{v_m, k, v_{m+1}}}]$ stellt die erwartete Länge für den Kreis K , in den Knoten k zwischen die Knoten v_m und v_{m+1} eingefügt wurde, dar.

²⁸¹ Vgl. Wels, A./ Richter, A. (2005), S. 410 f.

²⁸² Wird nach Formel (3.3) bestimmt.

zufällige Graphen²⁸³ mit einem Depot und 50 unsicheren Kunden. Die Wahrscheinlichkeiten p_i der Knoten i wurden, wie in der Tabelle 3-3 zu sehen ist, in Zehntelschritten von 0,1 auf 0,9 erhöht. Mit Ausnahme des letzten Testlaufs ("zufällig"), bei dem den Knoten per Zufallsgenerator verschiedene Wahrscheinlichkeiten zugewiesen wurden,²⁸⁴ haben die Knoten somit identische Wahrscheinlichkeiten je Testlauf. In der Tabelle 3-3 ist für jedes Verfahren pro Testlauf die durchschnittliche Tourlänge und die prozentuale Abweichung der Tourlänge vom Verfahren, das im Durchschnitt die kürzeste Tourlänge beim betrachteten Testlauf erzielt hat, angegeben.

Wahrscheinlichkeiten	NN	PNN	SE	PGA	EWE	MPGA
0,1	232,4	232,8	218,1	217,5	217,6	216,5
	7,3 %	7,5 %	0,8 %	0,5 %	0,5 %	-
0,2	351,3	339,0	315,8	314,5	315,7	312,7
	12,3 %	8,4 %	1,0 %	0,6 %	1,0 %	-
0,3	432,0	409,0	377,9	375,9	377,6	373,4
	15,7 %	9,5 %	1,2 %	0,7 %	1,1 %	-
0,4	487,0	475,2	425,5	422,5	425,4	419,6
	16,1 %	13,2 %	1,4 %	0,7 %	1,4 %	-
0,5	536,5	521,9	461,8	459,5	461,4	458,5
	17,2 %	13,8 %	0,7 %	0,2 %	0,6 %	-
0,6	576,8	565,3	496,2	496,3	494,0	493,2
	16,9 %	14,6 %	0,6 %	0,6 %	0,2 %	-
0,7	608,7	603,6	526,1	527,2	528,9	527,0
	15,7 %	14,7 %	-	0,2 %	0,5 %	0,2 %
0,8	633,6	630,3	551,4	553,5	555,0	553,7
	14,9 %	14,3 %	-	0,4 %	0,7 %	0,4 %
0,9	658,1	661,2	578,5	579,0	580,8	581,6
	13,8 %	14,3 %	-	0,08 %	0,4 %	0,5 %
zufällig	526,9	683,9	456,7	460,3	459,0	453,6
	16,2 %	50,8 %	0,7 %	1,5 %	1,2 %	-

Tab. 3-3: Testergebnisse für zufällige Graphen mit einem Depot und 50 unsicheren Kunden

Die Ergebnisse zeigen die schlechte Lösungsgüte des Verfahrens Wahrscheinlichkeitsorientierter Bester Nachfolger (PNN) und des Verfahrens Bester Nachfolger (NN). Deutlich bessere Ergebnisse erzielen hingegen die neuentwickelten Verfahren Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Probabilistic Gradual Add (PGA)) und Modifizierte Wahrscheinlichkeitsorientierte Sukzessive Einbeziehung (Modified Probabilistic Gradual Add (MPGA)) sowie deren deterministische Varianten (SE und EWE).

²⁸³ Zur Bestimmung der Beispieldaten wurde Gleichverteilung für die Erzeugung der Kundenstandortkoordinaten, unterstellt.

²⁸⁴ Auch zur Bestimmung der Beispieldaten im Testlauf „zufällig“ wurde Gleichverteilung für die Erzeugung der Kundenauftrittswahrscheinlichkeiten unterstellt.

Beim **Probabilistic Vehicle Routing Problem (PVRP)** wird nur kurz auf zwei Strategien zur Bedienung der Kunden eingegangen, die in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Informationsbekanntgabe bezüglich des Auftretens der Kunden gewählt werden können. Ziel bei der Bestimmung der a priori Tour ist wieder die Minimierung der erwarteten Länge. Zur Ausführung der Tour steht ein Fahrzeug mit beschränkter Kapazität zur Verfügung.²⁸⁵ Die Vorstellung von speziellen für das PVRP entwickelten Lösungsverfahren wie beim PTSP findet in dieser Arbeit nicht statt, da dass PVRP deutlich schwieriger zu lösen ist als das PTSP und entsprechende Verfahren sehr komplex sind.²⁸⁶ Die Schwierigkeit dieser Problemstellung resultiert aus der Unsicherheit darüber, wann die Kapazität des Fahrzeuges erschöpft ist und es dementsprechend zum Depot zurückkehren muss.

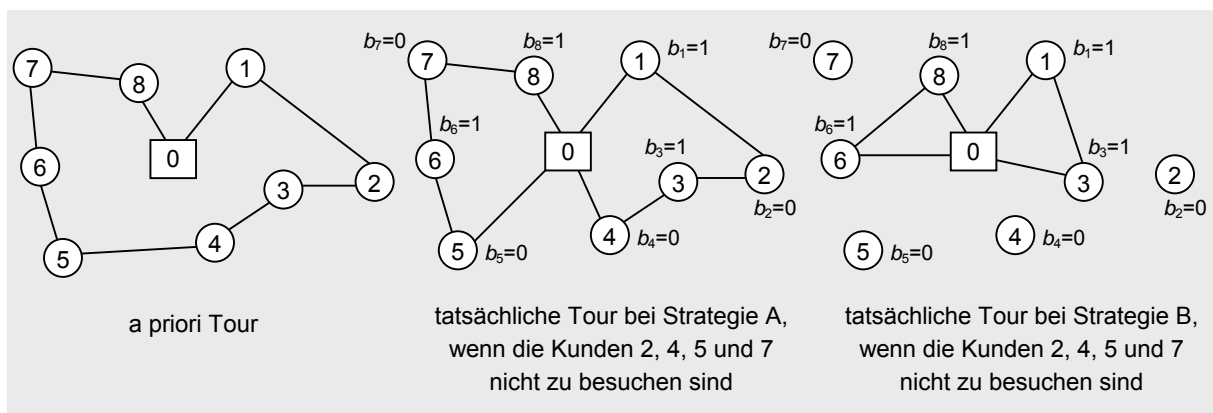


Abb. 3-4: PVRP-Strategien

Abbildung 3-4 zeigt die tatsächlich zu fahrende Route für das PVRP, wenn zuvor eine a priori Tour wie beim PTSP ermittelt wurde. Der Bedarf b_i aller Kunden sei 1 und die Kapazität des Fahrzeuges beträgt 2. Je nachdem ob bei Start der Fahrzeuge am Depot bekannt ist, welche Kunden tatsächlich einen Bedarf haben, erfolgt die Ausführung von Strategie A oder B. Bei A werden alle Kunden angefahren (auch wenn kein Bedarf vorliegt), während bei B aufgrund besserer Informationsbasis nur die Bedienung der Kunden erfolgt, die tatsächlich einen Bedarf haben. D. h. bei Strategie A ist die Nachfrage je Kunde erst bei Eintreffen des Fahrzeuges beim betreffenden Kunden bekannt. Bei Strategie B hingegen liegen Informationen über die Nachfrage der Kunden schon vor dem Start des Fahrzeuges am Depot vor. Ist die Kapazität des Fahrzeuges erschöpft, wird bei beiden Strategien die vordefinierte Route verlassen, das Depot aufgesucht und danach zur Route wieder zurückgekehrt. Das geschilderte Vorgehen stellt in beiden Fällen eine route first - cluster second Methode dar.

²⁸⁵ Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 306.

²⁸⁶ Gendreau et al. (1995) präsentieren ein exaktes Verfahren für das PVRP. Vgl. Gendreau, M. et al. (1995), S. 143 ff.

Bei Betrachtung des PVRP stellt sich die Frage, warum eine Unterscheidung in Strategie A und Strategie B, d. h. Bekanntheit der Kundenbedarfe oder nicht Bekanntheit der Kundenbedarfe bei Start des Fahrzeuges am Depot, erfolgt, aber dies im Gegensatz dazu nicht beim PTSP stattfindet. Würde beim PTSP die gesamte a priori Tour abgefahren (Strategie A) und erst beim Kunden bekannt werden, ob er einen Service wünscht bzw. einen Bedarf hat, entspräche die zu lösende Aufgabenstellung einem klassischen deterministischen Problem. Beim PVRP verhält es sich anders. Selbst bei Strategie A ist nicht bekannt, wann eine Erschöpfung der Fahrzeugkapazität eintritt. Infolgedessen sind die zusätzlichen Wege von der a priori Route zum Depot und zurück zur a priori Route nicht deterministisch. Strategie B gleicht dem zuvor beschriebenen Sachverhalt des PTSP. Aus der Unsicherheit welche Kunden tatsächlich auftreten, resultiert die Unsicherheit darüber, wann das Fahrzeug zwischen durch das Depot aufsuchen muss.

Für die folgenden Formeln zur Berechnung der erwarteten Tourlängen von Strategie A und B wird ein identischer Bedarf von 1 je Kunde unterstellt, der mit der Wahrscheinlichkeit p , die für alle Kunden identisch ist, auftritt.²⁸⁷ Die Fahrzeugkapazität sei Q und kleiner als die Kundenanzahl n . Wäre $Q \geq n$, würde die Fahrzeugkapazität nie ausgeschöpft werden und infolgedessen Strategie A ein TSP und Strategie B ein PTSP darstellen. Die erwartete Tourlänge beider Strategien lässt sich wie folgt ermitteln:^{288 289}

$$\text{Strategie A:} \quad E[L_T(S)] = \sum_{i=0}^n c_{i,i+1} + \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i s_{i,i+1} \quad (3.11)$$

$$\text{mit} \quad s_{i,i+1} = c_{0,i+1} + c_{0,i+1} - c_{i,i+1}$$

$$\beta_i = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, Q-1\}$$

$$\beta_i = \sum_{k=1}^{\lfloor i/Q \rfloor} p^{kQ} (1-p)^{i-kQ} \cdot \binom{i-1}{kQ-1} \quad \forall i \in \{Q, \dots, n-1\}$$

In Formel (3.11) gibt β_i die Wahrscheinlichkeit für ein zusätzliches Zurückkehren des Fahrzeuges zum Depot aufgrund erschöpfter Fahrzeugkapazität Q an. $s_{i,i+1}$ bemisst diesen zusätzlichen Weg.

²⁸⁷ Selbst unter diesen vereinfachenden Annahmen ist die Analyse des wahrscheinlichkeitsorientierten VRP schwer. Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 308.

²⁸⁸ Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 308 f.

²⁸⁹ Bei (3.11) und (3.12) wird wie bei (3.4) die Tour T , mit $T=[0,1,2,\dots,n,0]$, unterstellt; dabei gilt $i < j$.

$$\text{Strategie B:} \quad E[L_T(S)] = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \alpha_{ij} c_{ij} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \gamma_{ij} s_{ij} \quad (3.12)$$

$$\text{mit } s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

$$\alpha_{ii} = 0 \quad \forall i \in V$$

$$\alpha_{i,i+1} = p_i p_{i+1} \quad \forall i \in V$$

$$\alpha_{ij} = p_i p_j \left(\prod_{k=i+1}^{j-1} (1 - p_k) \right) \quad \forall i, j \in V$$

$$\gamma_{ij} = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, Q-1\}, \forall j \in V$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{k=1}^{\lfloor i/Q \rfloor} p^{kQ+1} (1-p)^{j-kQ-1} \cdot \binom{i-1}{kQ-1} \quad \forall i \in \{Q, \dots, n\}, \forall j \in V$$

Bei Strategie B wird mit γ_{ij} die Wahrscheinlichkeit für ein zusätzliches Zurückkehren des Fahrzeuges zum Depot aufgrund erschöpfter Fahrzeugkapazität Q in Formel (3.12) angegeben. Dabei gilt:²⁹⁰

$$\gamma_{ij} = p(1-p)^{j-i-1} \beta_i \quad \text{mit } i+1 \leq j \leq n$$

Abschließend wird kurz die Notwendigkeit dieser a priori Methoden erörtert. Die Notwendigkeit einer zukunftsgerichteten Planung, die im Voraus durchgeführt werden muss, konnte früher anhand mangelnder Rechentechnik oder einem schlechten Planungstool begründet werden, mit deren Hilfe eine real-time Planung und Optimierung nicht möglich war. Heute kann der Grund für diese im Voraus stattfindende Planung auf Basis von Wahrscheinlichkeiten fehlendes Personal zur täglichen bzw. dynamischen Tourenplanung sein, weil zum Beispiel nicht die mangelnde Rechenkapazität die Beschränkung darstellt, sondern die mit der Planung verbundenen Prozesse wie Dateneingabe und Ergebnisauswertung bzw. -übermittlung zu aufwändig sind.

Dass ein Unternehmen eine strategische oder taktische Planung durchführen möchte, kann ein anderer elementarer Grund für die Anwendung einer a priori Methode sein. Bei dieser strategischen oder taktischen Planung besteht die Möglichkeit auf Basis von Erwartungswerten die benötigte Anzahl an Fahrzeugen, Fahrern, Disponenten etc. für die Zukunft festzulegen.²⁹¹ Dabei kann beispielsweise neben der erwarteten notwendigen Fahrzeugkapazität die durchschnittliche Einsatzzeit der Fahrzeuge und Fahrer ermittelt werden. Ferner ist die bessere Einschätzung von auftretenden Veränderungen infolge sich erhöhender Kundenauf-

²⁹⁰ Vgl. Jaillet, P./ Odoni, A. (1988), S. 309.

²⁹¹ Ein anderer Ansatz zur Abschätzung von Tourlängen findet sich beispielsweise bei Beardwood, J. et al. (1959), S. 299 ff. und bei Daganzo, C. (1984), S. 331 ff.

trittswahrscheinlichkeiten, z. B. hervorgerufen durch steigenden Absatz bei saisonalen Produkten, möglich.²⁹²

Ein Vorteil einer a priori-Methode gegenüber einem real-time-Verfahren ist, dass die Touren identisch bleiben (d. h. die Reihenfolge der Tourstopps ist unveränderlich) und keine zusätzliche Konfusion dadurch entsteht, dass die Touren ständig verändert werden und unter Umständen jedes Mal anderen Fahrern zugewiesen werden.²⁹³ Im Gegensatz dazu wirkt sich die Bestimmung der Tour im Voraus, d. h. die Bedienungsfolge der Knoten, nachteilig auf die Auslastung des Fuhrparks aus. Wie bereits beim Konzept der Rahmentourbildung erwähnt, kann auf die schwankenden Transportlasten je Tour nicht entsprechend reagiert werden. Die Auslastung ist bei einem a priori-Konzept deutlich geringer als bei einem real-time-Verfahren.

3.4.2 Real-time Methoden

Arbeiten mit Methoden zur Bildung von Teilproblemen

Zuerst wird das dynamische Traveling Salesman Problem (DTSP) betrachtet, welches PSARAFTIS (1988) erstmals beschrieb.²⁹⁴ Er definiert das DTSP folgendermaßen: Es liegt ein vollständiger Graph G vor, bei dem zufällig Bedarfe an den n Knoten auftreten, die unabhängig voneinander verteilt sind. Das Auftreten der Bedarfe kann durch eine Poisson-Verteilung mit der Ankunftsrate λ beschrieben werden. Gesucht ist die "optimale" Route bzw. Strategie, durch die alle Knoten besucht werden. Dabei gilt es zu beachten, dass der Handelsreisende mit einer konstanten Geschwindigkeit unterwegs ist und bei jedem Knoten eine Standzeit zur Befriedigung des Bedarfes, d. h. Ausführung des Services, eingeplant werden muss. Der Begriff "optimale Route" wird durch die Ausgestaltung der Zielfunktion determiniert. Psaraftis schlägt für das DTSP als mögliche Zielstellungen vor, die Anzahl der bedienten Bedarfe pro Periode (Durchsatz) zu maximieren oder aber die durchschnittliche Wartezeit der Kunden zu minimieren. Die Lösung kann hinsichtlich der Ankunftsrate λ in den Fall einer geringen Ankunftsrate und dem Vorliegen einer hohen Ankunftsrate differenziert werden.

Für den Fall eines geringen λ erfolgt nur die Minimierung der Wartezeit. Die Maximierung des Durchsatzes entfällt, da es bei einem geringen λ zu keinen Kapazitätsengpässen bzgl. der Fahrzeuge kommt. Es gilt hierbei, dass der Durchsatz $n \cdot \lambda$ ist. Zur Minimierung der Wartezeit empfiehlt PSARAFTIS als Strategie, einen Bedarf sofort nach seinem Erscheinen zu befriedigen. Ist kein weiterer Kunde bzw. Auftrag vorhanden, wartet das Fahrzeug am letzten

²⁹² Vgl. Wels, A./ Richter, A. (2005), S. 403.

²⁹³ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 21.

²⁹⁴ Vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 244 ff.

bedienten Kunden bis zum Erscheinen des nächsten Kunden. PSARAFTIS zeigt, dass jegliche Rundreisepanung im Sinne von $i_1 \rightarrow i_2 \rightarrow \dots \rightarrow i_n \rightarrow i_1$ bei der Minimierung der Wartezeit schlechter abschneidet als die beschriebene Strategie.

Bei großem λ kann es sein, dass die Ankunftsrate so hoch wird, dass das Fahrzeug nicht mehr alle Bedarfe befriedigen kann. In solchen Fällen ist es möglich, dass neue Kunden zurückgewiesen werden müssen. Die Systemleistung weist dadurch einen geringeren Wert als $n \cdot \lambda$ auf. Bei einer hohen Ankunftsrate λ ist die Ermittlung der Strategie zur Minimierung der Wartezeit oder zur Maximierung des Durchsatzes nicht so einfach wie bei kleinem λ . PSARAFTIS gibt deshalb keine Verfahrensregel zur Bestimmung der optimalen Tour im Sinne der Zielkriterien minimale Wartezeit und maximaler Durchsatz an. Weitere Analyseaspekte, die PSARAFTIS in seiner Arbeit benennt, sind z. B. die Überprüfung, ob es bei einer geringen Ankunftsrate λ sinnvoll ist, das Fahrzeug bei Auftragsfreiheit an einem strategisch günstigen Punkt zu positionieren. Des Weiteren soll nach PSARAFTIS die stärkere Erforschung von Problemstellungen mit unvollständigen Graphen, mit euklidischer Entfernungsbestimmung vs. Entfernungsbestimmung basierend auf einem Graph oder mit symmetrischen vs. asymmetrischen Graphen erfolgen.²⁹⁵

Das Dynamic Traveling Repairman Problem (DTRP) wurde von BERTSIMAS und VAN RYZIN eingeführt und beinhaltet eine Problemformulierung, die auf der Warteschlangentheorie basiert. Die Grundversion beschreibt einen Monteur (ein Servicefahrzeug), der die im Zeitablauf eingehenden Reparaturaufträge zu erledigen hat. Weitere Varianten sind die Einbeziehung von m Fahrzeugen mit einer Kapazität Q .²⁹⁶ Das DTRP kann folgendermaßen beschrieben werden:²⁹⁷

- Alle Kundenbedarfe sind dynamisch und treten einem Poisson-Prozess folgend mit der Ankunftsrate λ auf.
- Die Koordinaten der Kunden sind von einander unabhängig sowie gleichmäßig in der Euklidischen Serviceregion mit der Fläche A verteilt.
- Das Fahrzeug operiert in dem begrenzten (und konvexen) Kundengebiet mit einer konstanten Geschwindigkeit g .
- Bei jedem Kunden i (mit $i=1, \dots, n$) benötigt das Fahrzeug eine Standzeit SZ_i , welche unabhängig voneinander und identisch verteilt sind. Der Erwartungswert der Standzeiten sei \overline{SZ} .

²⁹⁵ Vgl. Psaraftis, H. (1988), S. 246.

²⁹⁶ Vgl. Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1993), S. 60 ff.

²⁹⁷ Vgl. Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1991), S. 602.

- Die Systemzeit $SysZ_i$ pro Kunde i resultiert aus der Zeitspanne zwischen bekannt werden des Bedarfes und dem Serviceendzeitpunkt bei diesem Kunden: $SysZ_i = W_i + SZ_i$
- Die Wartezeit W_i jedes Kunden i ist die Zeitspanne zwischen Erscheinen des Kundenbedarfes und dem Servicestartzeitpunkt bei Kunde i : $W_i = SysZ_i - SZ_i$

Das zu minimierende Zielkriterium ist der Erwartungswert der Systemzeit, also die durchschnittliche Zeit, die ein Kunde warten muss bis der Service bei ihm abgeschlossen ist. Im Folgenden gilt es, eine Strategie zu finden, die die erwartete Systemzeit minimiert. BERTSIMAS und VAN RYZIN, BIANCHI, LARSEN und PAPASTAVROU erörtern die First Come First Serve Politik (FCFS), die Stochastic Queue Median Politik (SQM), die Traveling Salesman Problem Strategie (TSP), die modifizierte TSP Strategie (mod TSP), die Bester Nachfolger Strategie (NN), die Generation Strategie (GEN), die Space Filling Curve Politik (SFC) und die Partitioning Politik (PART).²⁹⁸

FIRST COME FIRST SERVE POLITIK (FCFS) (vgl. Abb. 3-5): Die Kunden werden in der Reihenfolge abgearbeitet wie sie eintreffen. Sind keine Aufträge mehr in der Warteschlange, wartet das Fahrzeug am letzten Kunden auf neue.

STOCHASTIC QUEUE MEDIAN POLITIK (SQM) (vgl. Abb. 3-6): Bei dieser Strategie fährt das Fahrzeug vom Median des Kundengebietes (Depot) aus direkt zu jedem Kunden und kehrt nach erfolgtem Besuch beim Kunden, sofern keine weiteren Aufträge vorliegen, wieder zum Median²⁹⁹ zurück; im Gegensatz zur FCFS-Politik, bei der beim letzten Kunden auf neue Aufträge gewartet wird. Auch hier erfolgt das Abarbeiten der in der Warteschlange befindlichen Kunden nach dem FCFS-Prinzip.

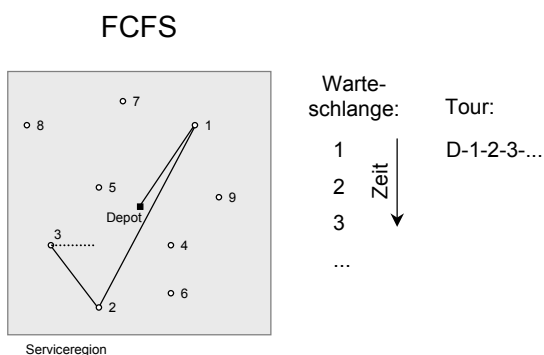


Abb. 3-5: FCFS-Strategie

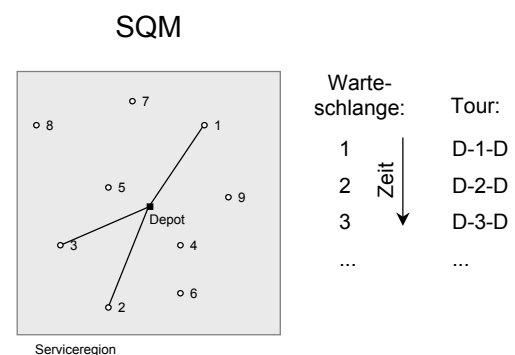


Abb. 3-6: SQM-Strategie

²⁹⁸ Vgl. Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1991), S. 607 ff., Bianchi, L. (2000), S. 8 ff., Larsen, A. (2001), S. 32 f., Papastavrou, J. (1996), S. 170 und Powell, W. et al. (1995), S. 212 f.

²⁹⁹ Der Median einer Fläche sei der Punkt, bei dem die Entfernung zu dem am weitesten entfernten Punkt (in Bezug auf den Median) minimiert wird: $\min_{x^*, y^*} \max_{i=1, \dots, n} \sqrt{(x^* - x_i)^2 + (y^* - y_i)^2}$; (x^*, y^*) sind die Koordinaten des Median und (x_i, y_i) die Koordinaten eines Kunden (Punktes) i (mit $i=1, \dots, n$).

TRAVELING SALESMAN PROBLEM STRATEGIE (TSP) (vgl. Abb. 3-7): Die eintreffenden Kunden werden in einer Menge der vorher definierten Mächtigkeit n gespeichert. Enthält die Menge n Elemente, wird die nächste begonnen. Die Speicherung der einzelnen Mengen erfolgt in einer Warteschlange, deren Abarbeitung nach dem FCFS-Prinzip stattfindet, d. h. das Servicefahrzeug erhält nach Beendigung der Tourdurchführung einer Menge die nächste Menge aus der Warteschlange zugewiesen. Liegt keine komplette weitere Kundenmenge der Mächtigkeit n in der Warteschlange vor, verweilt das Fahrzeug am Depot. Die Bestimmung einer optimalen Traveling Salesman Tour für jede Menge legt die Auslieferungsreihenfolge je Kundengruppe fest. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass jedes Teilproblem, d. h. jedes TSP, optimal gelöst wird. Im Rahmen dieser Strategie gilt es, den Parameter n zu optimieren.

MODIFIZIERTE TSP STRATEGIE (MOD TSP) (vgl. Abb. 3-8): Bei der modifizierten TSP Strategie sollen durch die Unterteilung des Kundengebietes in k einzelne Segmente größere räumliche Bündelungseffekte erreicht werden als bei der einfachen TSP Strategie. In jedem Segment findet die Bildung von Kundenmengen der Mächtigkeit $o \approx n/k$ statt.³⁰⁰ Die m -elementigen Mengen werden wie bei der einfachen TSP Strategie in einer Warteschlange gespeichert und nach der FCFS-Regel bearbeitet. Diese Politik macht es erforderlich, dass neben der Ermittlung des optimalen Parameters n , zusätzlich der Parameter k zu bestimmen ist.

Bei den ersten beiden beschriebenen Strategien FCFS und SQM erfolgt die Ablage der einzelnen Kunden in der Warteschlange, im Gegensatz zur TSP und MOD TSP Strategie, bei denen die Speicherung von Kundenmengen in der Warteschlange erfolgt.

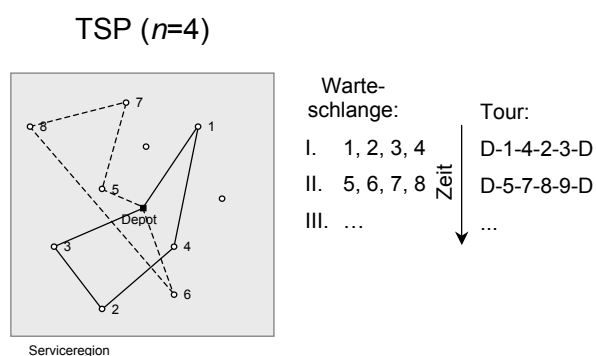


Abb. 3-7: TSP-Strategie

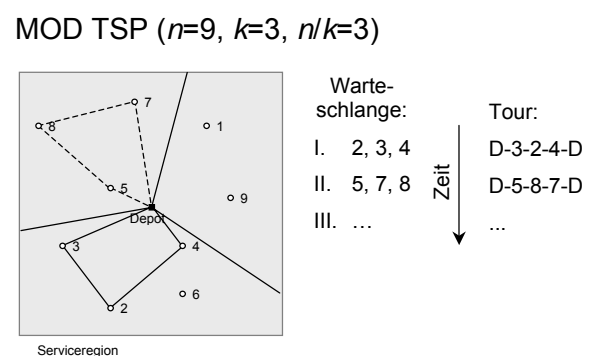


Abb. 3-8: MOD TSP-Strategie

BESTER NACHFOLGER STRATEGIE (NN) (vgl. Abb. 3-9): Hier wird jeder neu eingehende Kunde in einen Pool von noch nicht bearbeiteten Aufträgen aufgenommen. Sobald das Servicefahrzeug einen Kunden bedient hat, wählt der Fahrer aus dem Pool denjenigen noch

³⁰⁰ Bspw. kann o nach der Formel $o = \lceil n/k \rceil$ bestimmt werden.

nicht bearbeiteten Kunden als neuen Zielpunkt aus, der die kürzeste Entfernung zum aktuellen Standort aufweist.

GENERATION STRATEGIE (GEN) (vgl. Abb. 3-10): Anfänglich befindet sich das Fahrzeug am Median. Sobald ein Auftrag eingeht, fährt es zu diesem Kunden und führt den Service aus. Sind unterdessen keine weiteren Aufträge hinzugekommen, kehrt das Fahrzeug zum Median zurück und wartet bis zum nächsten Auftrag. Liegen jedoch bereits neue Aufträge vor, eine neue "Generation", werden diese nach einer optimalen TSP-Tour angefahren, wobei die Tour an den aktuellen Standpunkt des Fahrzeuges unmittelbar anschließt. Im Unterschied zur TSP Strategie ist bei der Generation Strategie die Kundenanzahl n einer TSP-Tour nicht fixiert.

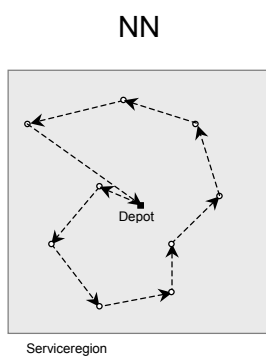


Abb. 3-9: NN-Strategie

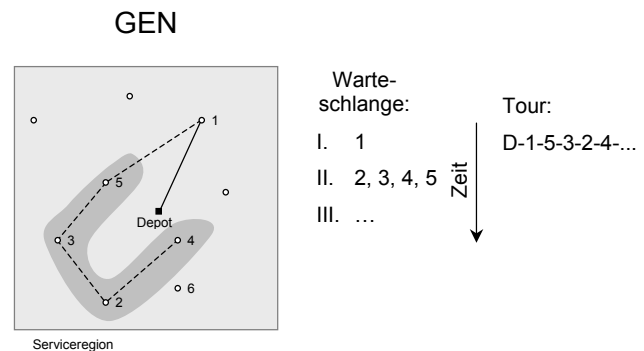


Abb. 3-10: GEN-Strategie

SPACE FILLING CURVE POLITIK (SFC) (vgl. Abb. 3-11): Die Kunden werden nach Kreissegmenten, in denen sie auftreten, bedient. Die Bildung der Kreissegmente erfolgt mit dem Uhrzeigersinn.

PARTITIONING POLITIK (PART) (vgl. Abb. 3-12): Das Kundengebiet wird in l^2 Unterregionen aufgeteilt. Innerhalb dieser Teilgebiete findet die Bedienung der Kunden nach dem FCFS-Prinzip statt. Das Fahrzeug fährt die Serviceteilgebiete eines nach dem anderen ab, dabei verweilt es in einem Teilgebiet solange, bis alle dort aktuell wartenden Kundenbedarfe bedient sind, danach wird in ein angrenzendes Gebiet gewechselt. Die Besuchsreihenfolge der Regionen ist vorgegeben.

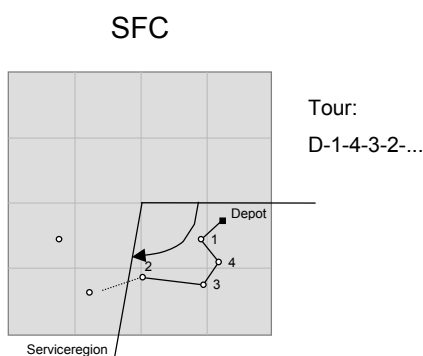


Abb. 3-11: SFC-Strategie

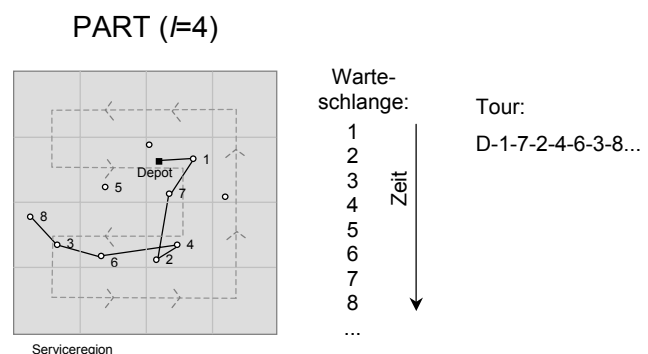


Abb. 3-12: PART-Strategie

Die ersten fünf der vorgestellten Strategien können auch für das m -Fahrzeuge Problem mit beschränkter Kapazität Q genutzt werden, während die Anwendung der letzten drei, GEN, SFC sowie PART, nur für ein Fahrzeug vorgesehen ist. Für die Strategien FCFS, SQM, TSP und MOD TSP gilt im m -Fahrzeuge Fall, dass jeweils das nächste freie Fahrzeug ein Element aus der Warteschlange entnimmt, egal ob nun ein einzelner Kunde wie bei FCFS und SQM oder eine Menge von Kunde wie bei TSP und MOD TSP entnommen wird. Bei der NN Strategie im Mehrfahrzeugfall starten alle m Fahrzeuge zu den ersten m Kunden und jedes Fahrzeug fährt nach erledigter Kundenbedienung zum jeweils nächstgelegenen Kunden.

In den Veröffentlichungen zum DTRP werden neben der Entwicklung von optimalen Strategien oder Politiken auch Stabilitätsbedingungen bzgl. des geltenden Ergebnisses für die Systemzeit aufgestellt, das Verhalten des Optimums des Erwartungswertes der Systemzeit bei variierender geographischer Verteilung der Kunden analysiert, untere Schranken für das Optimum bestimmt sowie das asymptotische Verhalten des Optimums bei einer geringen Ankunftsrate und bei einer hohen Ankunftsrate neuer Kunden diskutiert.³⁰¹ Die Überlegungen beziehen sich nicht nur auf das Ein-Fahrzeug Problem, sondern schließen auch die Betrachtung von m Fahrzeugen mit Kapazitätsbeschränkung Q ein. Folgende Ergebnisse können hierzu aufgezählt werden:³⁰²

- Bei geringer Systemauslastung ($\lambda \rightarrow 0$) lässt sich als Eigenschaft für die optimale Systemzeit SysZ^* angeben: $\text{SysZ}^* \rightarrow \frac{r}{g} + \overline{\text{SZ}}$ (für $\lambda \rightarrow 0$)

(r sei der Erwartungswert der Distanz zwischen dem Depot und einem Punkt in der Euklidischen Serviceregion mit der Fläche A .)

Als Stabilitätsbedingung für eine endliche Systemzeit gilt in diesem Fall: $\rho + \frac{2\lambda r}{mgQ} < 1$

Sind keine Kapazitätsbeschränkungen zu beachten (d. h. $Q = \infty$), dann vereinfacht sich diese Bedingung zu $\rho < 1$, mit $\rho = \lambda \cdot \overline{\text{SZ}}$. ρ gibt somit den Zeitanteil an der Gesamtzeit an, den das Fahrzeug direkt beim Kunden ist.

- Bei hoher Systemauslastung kann als Eigenschaft für die optimale Systemzeit SysZ^*

$$\text{angeben werden: } \text{SysZ}^* \sim \frac{\gamma^2 \lambda A \left(1 - \frac{1}{Q}\right)^2}{m^2 g^2 \left(1 - \rho - \frac{2\lambda r}{mgQ}\right)^2}, \text{ für } \rho + \frac{2\lambda r}{mgQ} \rightarrow 1$$

Bei unbeschränkter Kapazität ($Q = \infty$) reduziert sich dieser Ausdruck zu:

³⁰¹ Vgl. Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1991), S. 605 ff., Bianchi, L. (2000), S. 7 f., Larsen, A. (2001), S. 31 f. und Powell, W. et al. (1995), S. 212 f.

³⁰² Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 7.

$$\text{SysZ}^* \sim \frac{\gamma^2 \lambda A}{g^2 (1 - \rho)^2}, \text{ für } \rho \rightarrow 1$$

Des Weiteren wurden in der Literatur Ergebnisse bezüglich der Vorteilhaftigkeit der Strategien veröffentlicht.³⁰³ Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die SQM Politik bei geringer Systemauslastung nahezu optimal ist, NN sowie SFC sowohl bei geringer als auch bei hoher Auslastung gut abschneiden. NN und SFC haben außerdem den Vorteil, dass sie ohne zusätzliche Parameter auskommen, im Gegensatz zu einigen anderen Strategien. Die von PAPASTAVROU entwickelte Generation Politik soll den Nachteil beheben, dass bei geringer Auslastung die SQM und bei moderater sowie hoher Auslastung die NN oder SFC Strategie anzuwenden ist, indem seine Strategie bei beiden Szenarien sehr gute Ergebnisse liefert.³⁰⁴

Arbeiten mit Methoden zur Lösung von Teilproblemen

Die Vertreter dieser Gruppe von Veröffentlichungen testen verschiedene Heuristiken zur Lösung der Teilprobleme, die in eine vorher fixierte Strategie eingebettet sind. Die zugrundeliegende Strategie der in diesem Unterkapitel vorgestellten Arbeiten von LUND et al., LARSEN, GENDREAU et al., ICHOUA et al. und LACKNER ist folgende: Das dynamische Gesamtproblem wird in eine Vielzahl von einzelnen statischen Unterproblemen zerlegt, die bei Auftritt eines neuen Inputs entstehen. Die statischen Teilprobleme enthalten die zum Zeitpunkt des Hinzukommens des neuen Inputs bekannten unbearbeiteten Kunden. BIANCHI nennt diese Strategie **Single Event Optimization (SEO)**,³⁰⁵ da bei jedem Auftreten eines neuen dynamischen Kunden ein Teilproblem entsteht und gelöst wird.³⁰⁶ Erfolgt ein Vergleich zwischen SEO und den Strategien TSP, MOD TSP sowie GEN für das DTRP, fällt auf, dass bei letzteren ein Optimierungsalgorithmus nur nach Auftritt einer bestimmten Anzahl von neuen Kunden gestartet wird, im Gegensatz zur SEO-Politik, bei der eine Planung nach jedem Auftritt eines neuen Kunden erfolgt.

Da es sich bei der Single Event Optimization (SEO) - Strategie um eine rollierende Planung³⁰⁷ handelt, ist zu prüfen, welche Planungsergebnisse der vergangenen Planungen noch modifiziert werden können und welche hingegen nicht, da sie bereits ausgeführt wurden.

³⁰³ Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 11 f. und Larsen, A. (2001), S. 33.

³⁰⁴ Vgl. Papastavrou, J. (1996), S. 170.

³⁰⁵ Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 13.

³⁰⁶ Zu ergänzen ist, dass auch die SEO-Strategie eine Methode zur Bildung von Teilproblemen darstellt, die aber aufgrund ihrer Einfachheit nicht explizit im vorherigen Abschnitt „Arbeiten mit Methoden zur Bildung von Teilproblemen“ vorgestellt wurde.

³⁰⁷ Vgl. Domschke, W./ Scholl, A. (2002), S. 30.

Konkret für die dynamische Tourenplanung heißt das, dass folgende Arten von Bewegungen der Fahrzeuge zu unterscheiden sind:³⁰⁸

- *Abgeschlossene Züge*: ausgeführte Teilstrecken einer Tour; diese sind nicht mehr veränderbar, da sie in der Vergangenheit liegen
- *Aktueller Zug*: die Teilstrecke, auf der sich das Fahrzeug gerade befindet
- *Geplante Züge*: Teilstrecken, welche noch nicht abgefahren wurden, aber bereits geplant sind

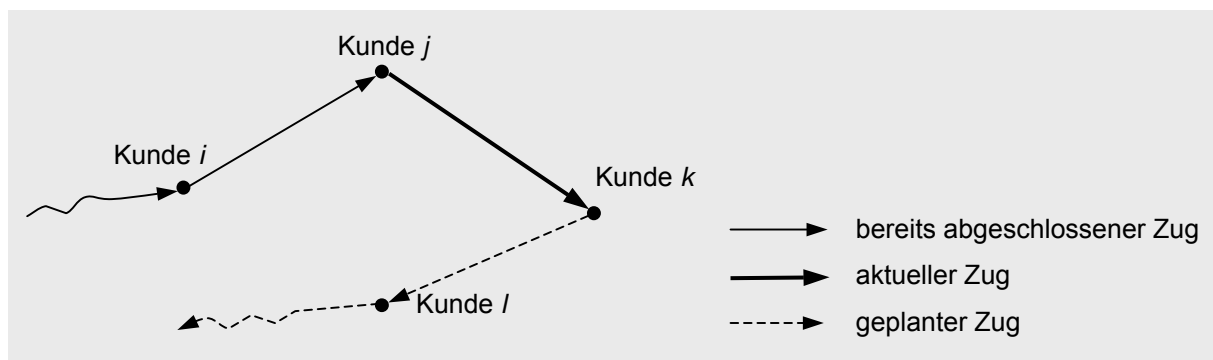


Abbildung 3-13: Unterschiedlicher Status von Fahrzeugzügen

Abbildung 3-13 zeigt diese drei Arten. Ein Eingriff im Rahmen der dynamischen Tourenplanung ist nur bei den geplanten Zügen und eventuell beim aktuellen Zug möglich. Liegt eine Anfrage bzgl. eines neuen Kunden vor, können die geplanten Züge so verändert werden, dass der neue Auftrag erfüllt wird, d. h. die Einplanung dieses neuen Auftrages erfolgt in eine bestehende Tour. Der aktuelle Zug kann nur bedingt verändert werden. Der Fahrer hat höchstens ab der aktuellen Position die Möglichkeit sein momentan angesteuertes Fahrziel zu wechseln und einen gerade neu durch die Disposition bestimmten Zielort anzusteuern. Bisherige Ansätze in der Literatur unterscheiden sich darin, ob der aktuelle Zug eines Fahrzeuges veränderbar ist oder nicht.³⁰⁹ Bei der im Folgenden stattfindenden Vorstellung einiger Verfahren zur dynamischen Tourenplanung wird auf diese Differenzierung besonders eingegangen, da bei den durch den Autor neu entwickelten Verfahren zur dynamischen Rundreise- und Tourenplanung die Möglichkeit besteht, den aktuellen Zug zu verändern.

Das von **LUND** et al.³¹⁰ entwickelte Verfahren löst kapazitierte dynamische Tourenplanungsprobleme mit Zeitfensterrestriktionen (Dynamic vehicle routing problem time window (DVRPTW)). Der praktische Hintergrund, der dazu motivierte, war die Heizölauslieferung an

³⁰⁸ Vgl. Ichoua, S. et al. (2003), S. 392.

³⁰⁹ Nur Ichoua et al. (2000) analysieren die Möglichkeit, den aktuellen Fahrzeugzug zu verändern. Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 430.

³¹⁰ Vgl. Lund et al. (1996), S. 6 ff.

Privathaushalte, bei der ca. 25 % der Kunden erst während der Auslieferung bekannt werden. Bei diesen dynamischen Kunden ist das Heizöl unerwartet ausgegangen, so dass diese eine schnellstmögliche Belieferung wünschen. Die von LUND et al. beachtete Dynamik bezieht sich nur auf das Auftreten der Kunden selbst, aber nicht auf die durch den Kunden geordnete Menge. LUND et al. benutzen folgendes Verfahren, welches auch als Simulator bezeichnet wird, zur Lösung des DVRPTW (vgl. Abbildung 3-14).

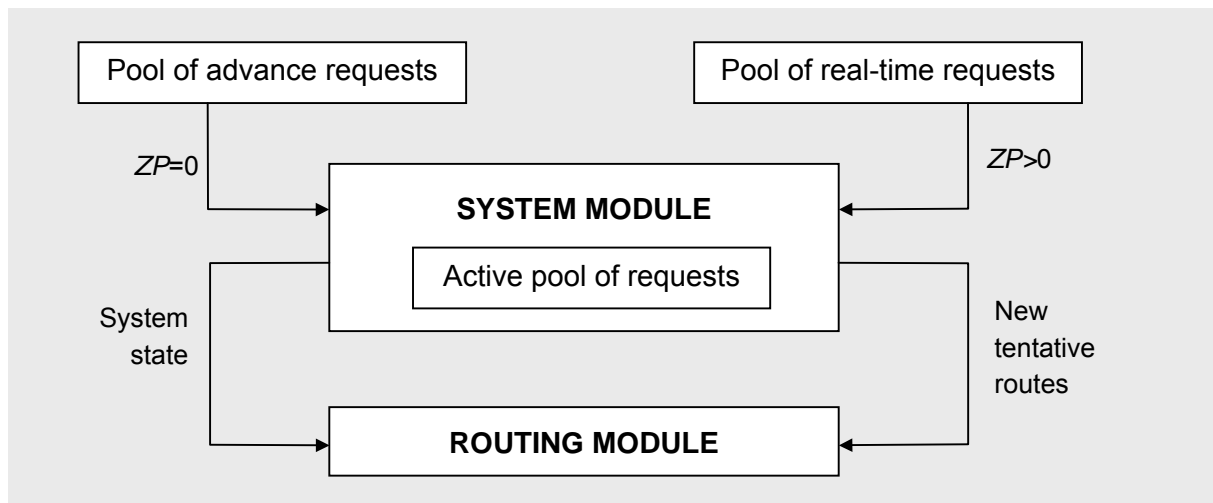


Abb. 3-14: Simulator zur dynamischen Tourenplanung nach LUND et al.

Quelle: Lund et al. (1996), S. 6.

Die Hauptbestandteile sind das Systemmodul (System Module) und das Tourenplanungsmodul (Routing Module). Das Systemmodul ist die sogenannte Controllingstelle des Simulators. Hier werden Ereignisse bzgl. der Kundenbedarfe und bzgl. der Fahrzeuge aufgezeichnet. Änderungen bei den Kundenbedarfen schlagen sich im "Active pool of requests" nieder. Diese Menge beinhaltet die aktuell wartenden Kundenaufträge. Sie wird verringert, sobald ein Auftrag abgearbeitet wurde, und vergrößert sich, wenn ein neuer Kunde auftritt. Anfänglich besteht der "Active pool of requests" nur aus den "advanced requests", den Kundenaufträgen, die vor dem Ausführungsstartpunkt ($ZP=0$) bekannt waren (statischer Kunde). Kommt zu einem Zeitpunkt $ZP>0$ ein neuer Kundenauftrag hinzu (dynamischer Kunde), erfolgt die Aktivierung des Tourenplanungsmoduls. Das momentane Tourenplanungsproblem, bestehend aus den Kundenaufträgen des "Active pool of requests" und den Informationen über die Fahrzeuge, wie aktuelle Position, verbleibende freie Kapazität sowie Status (fahrend, wartend, Stand beim Kunde), wird gelöst. Das Ergebnis bekommt das Systemmodul übergeben, wobei die geplanten Touren vorläufigen Charakter haben. Sobald ein neuer Kundenbedarf erscheint, kann die Lösung erneut verändert werden. Änderungen können sich allerdings immer nur auf den noch nicht ausgeführten Teil des letzten Planungsergebnisses beziehen und nicht auf bereits abgefahrene Planungsstrecken sowie bereits bediente Kunden. Des Weiteren ist zu beachten, dass bei dem Verfahren von LUND et al. der aktuelle Fahrzeugzug nicht geändert werden darf.³¹¹ LUND et al. schreiben daher,

nicht geändert werden darf.³¹¹ LUND et al. schreiben daher, "We here make the assumption, that a vehicle can not make a break off at an intermediate point between a customer A and the next customer B , i. e. the vehicle is locked to customer B ".³¹² Das System, der Simulator, prüft den Status jede Minute. Ferner geben LUND et al. genauso wie PSARAFTIS und LARSEN kurzfristig anstehenden Ereignissen ein größeres Gewicht als weiter entfernt in der Zukunft liegenden Ereignissen.³¹³ Infolgedessen weist das Systemmodul einem Fahrzeug erst zum spätest möglichen Zeitpunkt einen Kunden zu, d. h. wenn der Service bei Kunde j frühestens zum Zeitpunkt e_j beginnen darf, fährt das Fahrzeug erst zum Zeitpunkt $e_j - t_{ij}$ beim Kunden i ab, wobei t_{ij} die Fahrzeit von Kunde i nach j angibt. Bis zum Zeitpunkt $e_j - t_{ij}$ muss das Fahrzeug gegebenenfalls warten.

LUND et al. benutzen zur Planung der Touren einen auf der Einfüge-Heuristik von SOLOMON³¹⁴ basierenden Algorithmus. Bei dem modifizierten Verfahren werden die Touren jedes Mal von Grund auf neu geplant (globales Verfahren).³¹⁵ LUND et al. erhoffen sich dadurch bessere Ergebnisse, als wenn der zuvor berechnete Tourenplan in seiner Struktur erhalten bleibt und ein neuer Kunde nur eine bestimmte Tour verändern darf, d. h. nur eine lokale Modifizierung einer Tour erfolgt (lokales Verfahren). Aufgrund der Komplexität von Tourenplanungsproblemen (NP-schwer) wurde eine Heuristik verwendet, da bei real-time Problemstellungen die knappe zur Verfügung stehende Planungszeit verhindert, optimale Lösungen zu finden respektive die Anwendung eines exakten Verfahrens nicht sinnvoll ist. Im Rahmen der einzelnen Iterationsschritte bei Durchführung der Einfüge-Heuristik-Methodik ergibt sich die Einfügestelle für einen beliebigen Kunden in eine bereits während der Iterationen eröffnete Tour aus dem Minimum der gewichteten Summe des Umweges, der durch die Integration des Kunden entsteht, und der Wartezeit, die durch das Vorhandensein der Kundenzeitfenserschranken auftreten kann. Das Originalverfahren von SOLOMON musste um die aktuell bereitgestellten Informationen des Systemmoduls, wie geographische Position oder Restkapazität der Fahrzeuge, erweitert werden. Am Zeitpunkt $ZP=0$, dem Simulationsstart, werden die Touren mit dem vom Depot aus am weitesten weg gelegenen Kunden initialisiert. Für die Planungen zum Zeitpunkt $ZP>0$ (Planungen, die durch das Auftreten dynamischer Kunden initiiert werden) erfolgt die Initialisierung neuer Touren anhand der Minimierung einer gewichteten Kombination aus der Entfernung zwischen einzufügendem Kunden und aktueller Fahrzeugposition sowie der Entfernung zwischen einzufügendem Kunden und dem Depot. Dabei

³¹¹ Vgl. Lund et al. (1996), S. 4.

³¹² Lund et al. (1996), S. 4.

³¹³ Vgl. Lund, K. et al. (1996), S. 8, Psaraftis, H. (1988), S. 226 und Larsen, A. (2001), S. 9.

³¹⁴ Vgl. Solomon, M. (1987), S. 255 ff.

³¹⁵ Obwohl eine Einfügeheuristik ein lokales Verfahren darstellt, handelt es sich beim Verfahren von LUND et al. (1996) um ein globales Verfahren, da unter Anwendung der Einfügeheuristik die Touren von Grund auf neu geplant werden.

wird das Ziel verfolgt, dass der jeweils als Nächstes zu beliefernde Kunde einer Tour möglichst nah zur aktuellen Fahrzeugposition und weit weg vom Depot sein soll. Grundsätzlich bildet das ursprüngliche Verfahren von SOLOMON Touren nach einem sequentiellen Vorgehen.³¹⁶ Ausgehend von einer Starttour mit wenigen Kunden, werden weitere Kunden solange in eine bestehende Tour eingefügt, wie dadurch keine Restriktionen der Problemstellung verletzt werden. Die Restriktionen können die Kundenzeitfenster oder die Kapazitäten der Fahrzeuge sein. In jeder Iteration erfolgt die Auswahl eines noch nicht berücksichtigten Kunden, der an der "bestmöglichen" Position in die im Aufbau befindlichen Touren integriert werden soll. Existiert für keinen der noch nicht berücksichtigten Kunden eine zulässige Einfügeposition, startet der Aufbau einer neuen Tour. Sind alle Kunden in Touren aufgenommen, terminiert das Verfahren.

In real-time Tourenplanungsproblemen kann es durch das Auftreten von dynamischen Kunden nach Meinung von LUND et al. zu nicht lösbaren Planungsproblemen kommen. Aufgrund ungünstig liegender Kundenzeitfensterschranken des neuen Kunden wird eine Integration in den bestehenden Tourenplan (selbst wenn dieser von Grund auf neu geplant wird (globales Verfahren)), ohne dabei die Zeitfensterrestriktionen der anderen Kunden zu verletzen, unmöglich. Allerdings bleibt unklar, warum für den neuen Kunden in diesem Fall keine neue Einzeltour, die am Depot startet und endet, konstruiert wird. Sollte allerdings das Kundenzeitfenster zeitlich zu nah am aktuellen Zeitpunkt liegen, sodass ein am Depot startendes Fahrzeug diesen Kunden nicht mehr rechtzeitig erreichen kann, muss ergänzt werden, dass diese Problematik auch statische Tourenplanungsprobleme unlösbar macht. LUND et al. lösen diese Aufgabe, sofern keine gültige Lösung existiert, indem der neue dynamische Kunde so eingefügt wird, dass die Abweichung vom ursprünglichen Kundenzeitfenster minimiert wird. Da in der Praxis ebenso verfahren werden muss, ist diese Vorgehensweise durchaus gerechtfertigt.

LARSEN entwickelte das Verfahren von LUND et al. weiter.³¹⁷ Als Modifikationen wurden folgende zwei Aspekte implementiert. Das Fahrzeug kann nach seinem letzten Stopp bei einem Kunden zum Depot zurückkehren und muss nicht unterwegs auf einen neuen dynamischen Kunden warten. Durch das Aufsuchen des Depots hat das Fahrzeug wieder maximale Kapazität. Des Weiteren erfolgte die Einführung von Batching-Strategien. Zwei Arten, eine mengenorientierte und eine zeitorientierte Batching-Strategie, wurden implementiert. Bei der mengenorientierten werden Kunden bis zu einer bestimmten Anzahl n (z. B. $n = 10$ Kundenaufträge) und bei der zeitorientierten bis zu einer bestimmten Zeitgrenze I (z. B. $I = 20$ Minu-

³¹⁶ Vgl. Weissermel, M. (1999), S. 44.

³¹⁷ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 86 f.

ten) gesammelt, bevor eine Neuplanung der Touren erfolgt. Ziel der Batching-Strategien ist, dass eine höhere Güte der Planung erreicht wird, wenn sie zeitversetzt erfolgt und mehrere neue Inputs gesammelt eingehen, als wenn jedes Mal sofort nach Eingang eines neuen Inputs geplant wird. Als Hauptnachteil dieser Verfahrensweise gilt, dass nicht sofort eine Rücksprache mit dem Kunden über das Anlieferzeitfenster erfolgen kann. Der Kunde muss nach durchgeführter Planung gegebenenfalls zurückgerufen werden.

Auch **GENDREAU** et al. beschäftigen sich mit dem DVRPTW im unkapazitierten Fall.³¹⁸ Sie verwenden zur Optimierung, d. h. zur Lösung des statischen Teilproblems, einen adaptiven Tabu Search Algorithmus. Hauptelemente der verwendeten Tabu Search Variante sind der adaptive Speicher (Diversification), eine Dekompositions-/ Rekonstruktionsprozedur (Intensification), ein kettenbasiertes Austauschverfahren und eine parallele Implementierung.³¹⁹ Ferner wurden einige weitere heuristische Verfahren, wie beispielsweise eine Einfüge-Heuristik oder das Adaptive Local Descent Verfahren, das den adaptiven Tabu Search Algorithmus enthält, wobei dieser am ersten lokalen Minimum abbricht, zu Vergleichszwecken getestet. Die bedeutendsten Untersuchungsergebnisse sind, dass die adaptiven Verfahren bessere Ergebnisse erzielen, besonders das adaptive Tabu Search Verfahren, des Weiteren, dass der Unterschied in der Lösungsqualität zwischen den adaptiven und den anderen einfacheren heuristischen Verfahren bei geringerer Dynamik größer ist als bei stark dynamischen Problemen. Dieser Fakt ergibt sich aus kürzeren zur Verfügung stehenden Rechenzeiten zwischen dem Bekanntwerden zweier neuer Kunden bei starker Dynamik, denn nur bei ausreichender Rechenzeit können die adaptiven Verfahren ihre Vorteile vollständig entfalten. Dazu kann ergänzt werden, dass das adaptive Tabu Search Verfahren umso bessere Ergebnisse liefert, je mehr parallele Prozessoren zur Verfügung stehen.

ICHOUA et al. stellen ein Verfahren vor,³²⁰ bei dem genauso, wie bei den in dieser Arbeit präsentierten durch den Autor neu entwickelten Verfahren, der aktuelle Zug verändert werden kann. Das Verfahren berücksichtigt Kundenzeitfenster, jedoch keine Kapazitäten, da es für die KEP-Branche entwickelt wurde, und dort vorwiegend für Bereiche, bei denen Kapazitäten aufgrund kleiner Sendungsgrößen keine Rolle spielen. Die Konstruktion der Touren erfolgt durch die Kombination einer Einfügeheuristik und eines Tabu Search Verfahrens.³²¹ ICHOUA et al. bauen dabei auf dem von GENDREAU et al. entwickelten Verfahren auf. Die Einfügeheuristik dient zur Bestimmung einer Startlösung, während das Tabu Search Verfah-

³¹⁸ Vgl. Gendreau, M. et al. (1999), S. 381 ff.

³¹⁹ Vgl. Gendreau, M. et al. (1999), S. 383 f. sowie insbesondere zu parallelen Versionen von metaheuristischen Methoden Crainic, T./ Toulouse, M. (1998), S. 205 ff.

³²⁰ Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 426 ff.

³²¹ Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 429 ff.

ren diese dann verbessert. Das Tabu Search Verfahren, eine Metaheuristik, verursacht einen Zielkonflikt zwischen der Qualität der Lösung und der benötigten Rechenzeit. Metaheuristiken generieren zwar i. d. R. bessere Ergebnisse, sind aber auch rechenzeitintensiver als klassische Heuristiken.

Ausgehend von der Startlösung erzeugt der Tabu Search Algorithmus durch CROSS-Tausche neue Lösungen. Beim CROSS-Tausch werden zwei Segmente mit variabler Länge aus unterschiedlichen Touren gegeneinander ausgetauscht. Bis zu einem vorher definierten Abbruchkriterium erfolgt die Speicherung aller neu erzeugten Lösungen in einem sogenannten "adaptive memory". Dabei ersetzt eine neue Lösung jeweils die schlechteste Lösung aus dem Speicher, sofern sie besser ist. Wurde das Abbruchkriterium erreicht, wird die beste bekannte Lösung aus dem "adaptive memory" als Ergebnis ausgewählt.

Zur Anwendung des Verfahrens in einem dynamischen Umfeld findet folgende Vorgehensweise Anwendung. Sobald ein neuer dynamischer Kunde vorliegt, wird versucht, diesen in alle Lösungen des "adaptive memory" einzufügen. Ist das Einfügen in alle Lösungen unzulässig, geschieht die Ablehnung des Kunden. Sind hingegen nur einige Varianten unzulässig, werden diese aus dem Speicher entfernt. Die Lösungen, bei denen die Integration des neuen Kunden zulässig ist, bleiben erhalten. Auf die beste Variante dieser zulässigen Lösungen erfolgt die Anwendung einer lokalen Suchheuristik, die auf Basis der CROSS-Tausche operiert. Die dadurch erzeugten neuen Lösungen werden wiederum im "adaptive memory" abgelegt. Für die Veränderung des aktuellen Zuges sind neben dem Einfügen des neuen dynamischen Kunden auch sogenannte "dummy" Knoten, die die aktuelle Fahrzeugposition repräsentieren, in die verschiedenen Lösungen des Speichers einzufügen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die geplanten Touren ab der aktuellen Fahrzeugposition ("dummy" Knoten) mittels des Tabu Search Algorithmus optimiert werden. Zu beachten ist des Weiteren, dass aufgrund der Rechenzeit δt , die für den Tabu Search Algorithmus angesetzt wird, die erwarteten Fahrzeugpositionen für den Zeitpunkt $ZP + \delta \cdot ZP$ (ZP stellt den aktuellen Zeitpunkt dar) in die Lösungen des "adaptive memory" einzufügen sind. Ferner handelt es sich beim Verfahren von ICHOUA et al. um eine Kombination aus lokalem und globalem Verfahren. Das Einfügen des neuen Kunden in die Lösungen des Speichers stellt ein lokales Vorgehen dar, während die anschließende Optimierung der Tourenpläne mittels des Tabu Search Algorithmus aufgrund der CROSS-Tausche als ein globales Verfahren bezeichnet werden kann. Die Arbeit enthält neben Tests zur Lösungsgüte auch Analysen, wie groß die für den Tabu Search Algorithmus zur Verfügung zu stellende Rechenzeit $\delta \cdot ZP$ zu wählen ist.

Die Arbeit von **LACKNER** beschäftigt sich, wie in Kapitel 3.2 bereits erwähnt, mit der Anwendung von metaheuristischen Optimierungsverfahren auf das dynamische Tourenplanungsproblem. Dabei werden zwei Evolutionäre Strategien, ein Ameisenalgorithmus und das Simulated Annealing getestet und verglichen. Bei LACKNER erfolgt die Betrachtung eines kapazitätsrestriktiven dynamischen Tourenplanungsproblems mit Kundenzeitfenstern, bei dem nur die Anzahl der zu bedienenden Kunden dynamisch ist. Eine Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges kann nicht erfolgen, d. h. das momentan durch ein Fahrzeug anvisierte Ziel darf nicht verändert werden.³²² Da eine Darstellung der von LACKNER verwendeten Metaheuristiken sehr umfangreich wäre, sei für ausführliche Informationen zu den Verfahren auf die Arbeit von LACKNER verwiesen.³²³ Zu ergänzen ist noch, dass die Arbeit von Lackner keinen Vergleich zu den Arbeiten von LARSEN und LUND et al. enthält.

Zusammenfassend wird in Tabelle 3-4 zu den zuvor beschriebenen Verfahren von LUND et al., LARSEN, GENDREAU et al., ICHOUA et al. und LACKNER zur dynamischen Tourenplanung aufgelistet, auf welcher Grundidee bzw. Methode die Verfahren aufsetzen, welche Restriktionen beachtet werden und ob der aktuelle Fahrzeugzug veränderlich ist. Die Möglichkeit der Veränderung der aktuellen Fahrzeugbewegungen ist, wie bereits erwähnt, ein zentrales Thema dieser Arbeit. Tabelle 3-4 fasst diese Problematik für die wichtigsten bis jetzt in der Literatur erschienenen Verfahren zusammen.

Autor	Grundidee	Beachtung von Kapazitätsrestriktionen	Beachtung von Kundenzeitfenstern	Änderung des aktuellen Zuges möglich
LUND et al. (1996) (Lund, K./ Madsen, O./ Rygaard, J.)	basiert auf Einfügeheuristik von Solomon	ja	ja	nein
LARSEN (2001)	Weiterentwicklung des Verfahrens von LUND et al.	ja	ja	nein
GENDREAU et al. (1999) (Gendreau, M./ Guertin, F./ Potvin, J.-Y./ Taillard, E.)	Tabu Search Metaheuristik, die auf TAILLARD zurückgeht	nein	ja	nein
ICHOUA et al. (2000) (Ichoua, S./ Gendreau, M./ Potvin, J.-Y.)	basiert auf Tabu Search Metaheuristik von GENDREAU et al.	nein	ja	ja
LACKNER (2003)	Anwendung mehrerer Metaheuristiken: Evolutionäre Strategien, Ameisenalgorithmus und Simulated Annealing	ja	ja	nein

Tab. 3-4: Restriktionen ausgewählter dynamischer Tourenplanungsverfahren

³²² Vgl. Lackner, A. (2003), S. 89.

³²³ Vgl. Lackner, A. (2003), S. 100 ff.

Abbildung 3-15 visualisiert abschließend die Auswirkungen der beiden Varianten, *Veränderung des aktuellen Zuges nicht möglich* und *Veränderung des aktuellen Zuges möglich*, bei Auftreten eines neuen Kunden nochmals. In Abhängigkeit davon, an welcher geographischen Position ein neuer Kunde erscheint und wo sich ein Fahrzeug gerade befindet, kann es mehr oder weniger nachteilig sein, wenn der aktuelle Zug nicht korrigiert werden darf.³²⁴

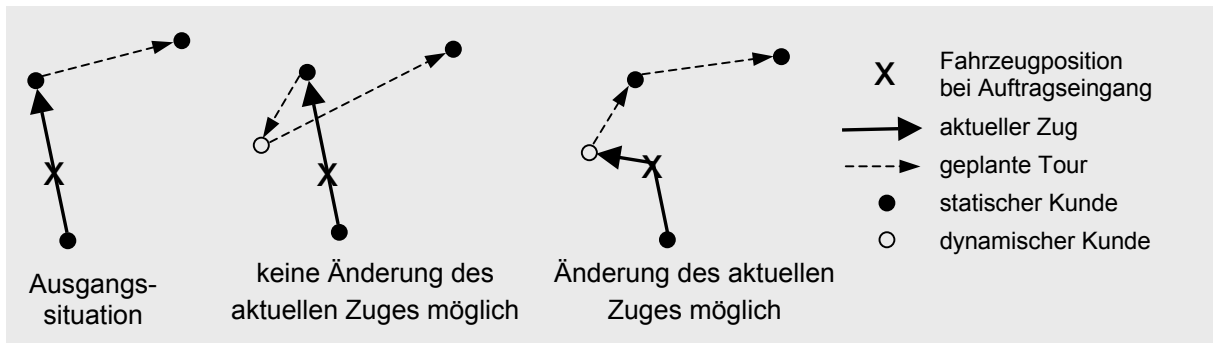


Abb. 3-15: Vergleich zwischen Veränderung und keiner Veränderung des aktuellen Zuges

Auch LARSEN's Aussage "The geographical locations of all vehicles each time new immediate requests are received are one of the most commonly missing data items in the study of real-life problems"³²⁵ postuliert, dass es wichtig ist, durch geeignete technische Unterstützung anhand des Wissens über die aktuellen Fahrzeugpositionen bereits den aktuellen Zug zu verändern. Ähnliches kann der Arbeit von BIANCHI entnommen werden, in der herausgestellt wird, dass bei den bis jetzt entwickelten Verfahren zur Lösung dynamischer Tourenplanungsprobleme den Fahrzeugen die Möglichkeit fehlt, ein einmal anvisiertes Ziel wieder zu verändern.³²⁶ Daher sieht BIANCHI noch Entwicklungsbedarf in der Implementierung der Zulässigkeit, das aktuelle Ziel eines Fahrzeuges zu verändern.

Ergänzend zu den bereits vorgestellten Verfahren sei noch das Fixtourekonzept, welches Touren nach und nach fixiert, kurz erwähnt.³²⁷ STUMPF beschreibt, in Ahnlehnung an PSARAFTIS, dieses Konzept einer rollierenden Planung, wobei besonders "gute" Touren fixiert werden. Es erfolgt das Herausziehen der fixierten Touren, die restlichen unfixierten Touren stehen in späteren Planungsläufen erneut zur Disposition. Nach Fixierungskriterien wie „Auslastungsgrad des Fahrzeuges“ oder „Höhe der Bündelung“ können "gute", d. h. zu fixierende, Touren identifiziert werden. Fixierte Touren bleiben bei neuerlichen Planungsläufen

³²⁴ Die Vorteilhaftigkeit wird im Rahmen von numerischen Tests in Kapitel 4.5.2 überprüft. Zudem befinden sich Beispiele, bei denen sich die Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges als vorteilhaft erweist, in Kapitel 4.2.2 bis 4.2.5 und 4.3.2. Negative Beispiele werden in Kapitel 4.2.6 betrachtet.

³²⁵ Larsen, A. (2001), S. 7.

³²⁶ Vgl. Bianchi, L. (2000), S. 15.

³²⁷ Vgl. Stumpf, P. (1998), S. 262 ff. und auch Psaraftis, H. (1988), S. 235 ff.

i. d. R. dann unverändert, somit kann die Durchführung solch einer Tour unmittelbar beginnen. Bei dieser Vorgehensweise bleibt kritisch zu bemerken, dass durch die im Allgemeinen nicht revidierbare Fixierung einiger Touren eine Verringerung des Optimierungspotenzials stattfindet. So könnte z. B. ein neuer Auftrag noch größere Bündelungseffekte in einer fixierten Tour erzielen, er kann aber bei striktem Vorgehen nicht in diese Tour aufgenommen werden.

3.5 Grad der Dynamik

Tourenplanungsprobleme müssen nicht ausschließlich statisch oder dynamisch sein, sondern es kann auch partiell dynamische Systeme geben. Das folgende Kapitel befasst sich mit Kennzahlen, die auf verschiedenste Art und Weise beschreiben, wie "dynamisch" ein System ist. Zusätzlich werden weitere Einflussfaktoren bezüglich der Dynamik bzw. der Komplexität des Planungsproblems analysiert. Dieses Wissen über die Struktur des dynamischen Problems kann beispielsweise bei der Auswahl des zur Lösung heranzuziehenden Verfahrens oder bei der Konstruktion von neuen Lösungsalgorithmen hilfreich sein. Ferner können aber auch, resultierend aus den Informationen über das dynamische System, geeignete Maßnahmen durchgeführt werden, die die Dynamik des Systems verringern, wie z. B. höhere Preise für dynamische Kunden.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Dynamik eines Systems stellt der von LUND et al. entwickelte *Grad der Dynamik (degree of dynamism (dod))*³²⁸ dar. Diese Kennzahl gibt den Anteil der dynamischen Kunden an der Gesamtkundenanzahl wieder.

$$dod = \frac{\text{Dynamische Kunden}}{\text{Gesamtkundenanzahl}} = \frac{n_d}{n_{total}} = \frac{n_d}{n_s + n_d}, \quad dod \in [0,1] \quad (3.13)$$

Die Variable "Gesamtkundenanzahl" n_{total} vereint alle statischen (n_s) und dynamischen Kunden (n_d). Beispielsweise ergibt sich ein Wert von 0,6 für den Grad der Dynamik, wenn 6 von 10 Kunden dynamisch sind. Liegen nur statische Kunden vor, ist der *dod* gleich 0, im entgegengesetzten Fall gleich 1.

Hierbei handelt es sich allerdings nur um ein absolutes Maß, welches nicht die Ankunftszeit der Kunden berücksichtigt. Denkbare Szenarien sind z. B., dass alle Kunden im ersten Teil des Planungshorizontes auftreten (Szenario A), alle Kunden im zweiten Teil des Planungshorizontes bekannt werden (Szenario B) oder der Auftragseingang gleichverteilt über den

³²⁸ Vgl. Lund, K. et al. (1996), S. 3 sowie Larsen, A. (2001), S. 55 ff.

Operationszeitraum ist (Szenario C), um nur drei charakteristische Beispiele zu nennen (vgl. Abbildung 3-16).

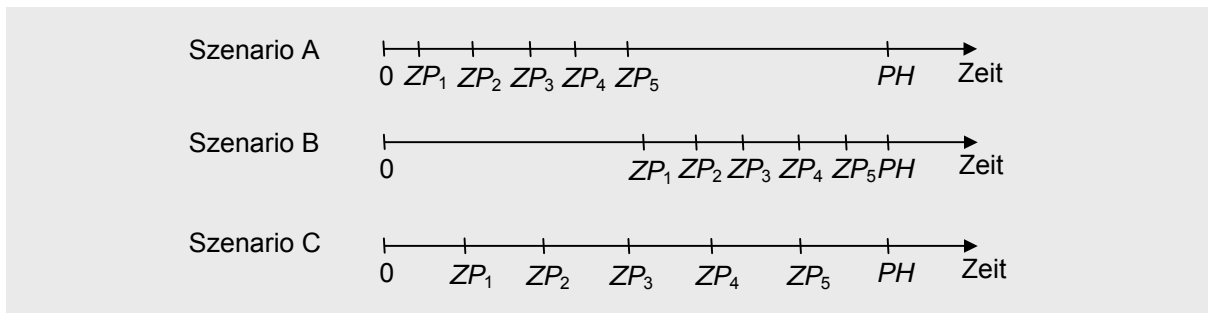


Abb. 3-16: Unterschiedliche Verteilung von dynamischen Kunden im Dispositionszeitraum nach der Ankunftszeit

In Anlehnung an Larsen, A. (2001), S. 57.

Aus der Sicht des Disponenten wäre sicherlich der 3. Fall (Szenario C) wünschenswert, um eine gleichmäßige Arbeitslast zu haben. Hierbei liegt allerdings ein Zielkonflikt zwischen der gleichmäßigen Arbeitslast und der Erreichung einer minimalen Gesamtfahrstrecke vor. Das Zielkriterium "Minimale Gesamtfahrstrecke" kann besser erreicht werden, wenn alle Daten möglichst frühzeitig innerhalb des Planungshorizontes bekannt werden.

LARSEN entwickelte deshalb den "effective degree of dynamism", der auf das erste Szenario abzielt, d. h. für eine minimale Gesamtfahrstrecke förderlich ist.³²⁹

$$edod = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{ZP_i}{PH} \right)}{n_{total}}, \quad edod \in [0,1] \quad (3.14)$$

Der Planungshorizont hat die Länge PH . ZP_i gibt die Kundeneingangszeit an, wobei $ZP_i = 0$ für die statischen und $ZP_i \in (0, PH]$ für die dynamischen Kunden gilt. Treten alle Kunden im Vorhinein auf ($ZP_i = 0 \quad \forall i$), ist der $edod$ gleich 0. Gehen alle Aufträge am Ende des Planungshorizontes ein, weist der $edod$ einen Wert nahe 1 auf. Ein $edod$ -Wert von 0 oder nahe 0 bedeutet dementsprechend, dass entweder keine Unsicherheit ($edod=0$) bzgl. des Auftretens weiterer Kundenaufträge vorliegt oder dass diese Unsicherheit schon am Anfang des Planungshorizontes komplett verschwindet. Der Tourenplaner muss somit im weiteren Verlauf des Planungshorizontes seine Planungen nicht mehr anpassen und seine zuvor als „optimal“³³⁰ angenommenen Planungsergebnisse müssen nicht weiter revidiert werden. Zudem haben die Fahrzeuge am Anfang des Planungshorizontes erst wenig Fahrstrecke zurückgelegt. Somit können neue Planungsergebnisse am Anfang des Planungshorizontes nur geringe negative Auswirkungen auf das Zielkriterium minimale Gesamtfahrstrecke ha-

³²⁹ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 57 f.

³³⁰ Der Begriff „optimal“ sei hier im Sinne der durch den Tourenplaner benutzten Planungsmethode verwendet.

ben. Dies liegt daran, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines dynamischen Kunden in einer bereits bedienten Region, viel geringer ist, als wenn der dynamische Kunde erst gegen Ende des Planungshorizontes auftritt. Am Ende des Planungshorizontes haben die Fahrzeuge ihre Touren fast abgeschlossen. Die Bedienung eines neuen (dynamischen) Kunden verursacht dann i.d.R. einen Umweg (d. h. die Fahrzeuge steuern erneut eine Region an, die sie bereits bedient haben), der sich negativ auf das Zielkriterium minimale Gesamtfahrstrecke auswirkt.

Sind für das Planungsproblem Kundenzeitfenster zu beachten, schlägt LARSEN folgende Formel vor.³³¹

$$edod-tw = \frac{1}{n_{total}} \sum_{i=1}^{n_{total}} \left(\frac{PH - (l_i - ZP_i)}{PH} \right) = \frac{1}{n_{total}} \sum_{i=1}^{n_{total}} \left(1 - \frac{r_i}{PH} \right) \quad (3.15)$$

Über die zur Verfügung stehende Reaktionszeit r_i zur Einplanung bzw. Bedienung des Kunden i , mit $r_i = l_i - ZP_i$, wobei l_i das Zeitfensterende repräsentiert, kann die Schwierigkeit der Problemstellung je nach Gestaltung der Zeitfenster in die Berechnung mit einbezogen werden (vgl. dazu auch Abbildung 3-17). Je kleiner die Reaktionszeit ist, desto größer wird der *edod-tw*. Da $ZP_i \leq l_i$ gilt, kann auch der *edod-tw* nur Werte von 0 bis 1 annehmen.

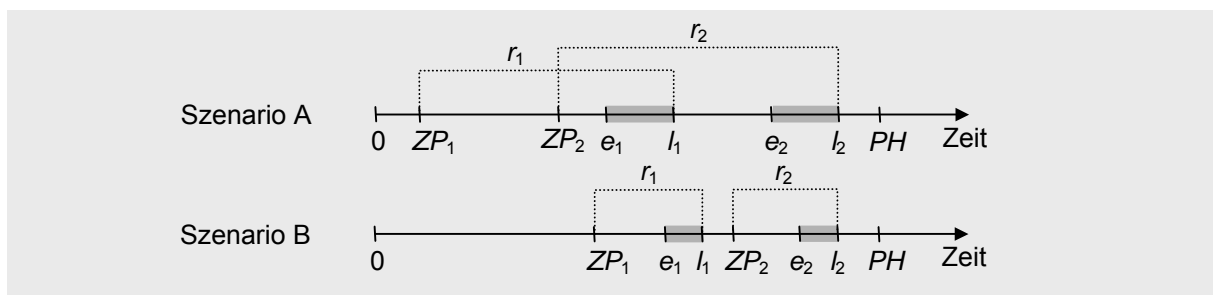


Abb. 3-17: Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Ankunftszeit und dem Kundenzeitfensterende der dynamischen Kunden (e_i ...Kundenzeitfensterbeginn)
Quelle: Larsen, A. (2001), S. 60.

Die zur Verfügung stehende Reaktionszeit ist demnach die Zeitspanne zwischen dem Auftragseingang und dem spätest möglichen Zeitpunkt, an dem der Service beim Kunden beginnen darf (d. h. das Ende des Kundenzeitfensters). Je kürzer diese Zeit ist, desto dringlicher ist die Belieferung des Kunden. Für eine leichtere Planung sollte die zur Verfügung stehende Reaktionszeit $r_i = l_i - ZP_i$ (potentielle Zeit zur Ausführung der Planung abzüglich der Fahrzeit zu Kunde i) möglichst lang sein.

³³¹ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 60.

Demgegenüber ist die tatsächliche Reaktionszeit des Unternehmens, d. h. die Wartezeit³³² des Kunden auf die Erfüllung seines Services, abzugrenzen. Diese Wartezeit des Kunden gilt es zu minimieren, denn je kürzer die Reaktionszeit des Unternehmens (d. h. die Wartezeit des Kunden), desto höher der Servicegrad. Dabei ist auch die Beziehung zwischen Grad der Dynamik und Wartezeit des Kunden zu berücksichtigen. Hier gilt: Je dynamischer das Tourenplanungsproblem ist, desto schwieriger wird es, eine kurze Wartezeit des Kunden zu erreichen.³³³ Das Unternehmen kann Einfluss auf die eigene tatsächliche Reaktionszeit, d. h. die Wartezeit der Kunden, nehmen, indem zum Beispiel die Fuhrparkkapazität oder die Anzahl der Disponenten erhöht wird. Dies ist allerdings mit Kosten verbunden.

Vor allem aus dem *dod* resultierend, wurde in der Literatur die Dreiteilung in schwach dynamische, moderat dynamische und stark dynamische Systeme vorgenommen (vgl. Abbildung 3-18).³³⁴

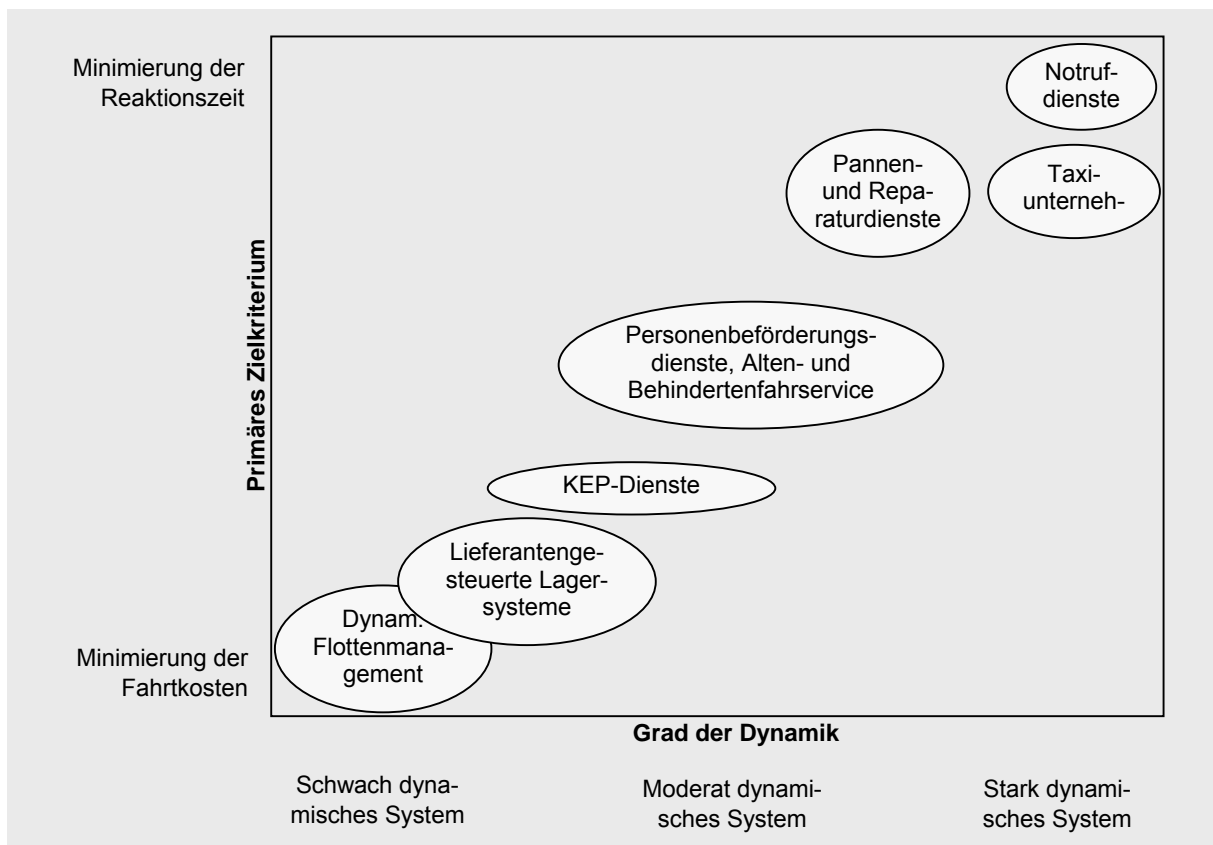


Abb. 3-18: Klassifizierung von Anwendungsgebieten der dynamischen Tourenplanung nach dem Grad der Dynamik und des primär verfolgten Zielkriteriums
In Anlehnung an Larsen, A. (2001), S. 63.

³³² Die Wartezeit (auch als Lieferzeit bezeichnet) wird hier als die Zeitspanne zwischen Auftragseingang und Abschluss des Service beim Kunden definiert.

³³³ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 8.

³³⁴ Vgl. Larsen, A. et al. (2002), S. 639 f., Larsen, A. (2001), S. 60 ff. und Ghiani, G. et al. (2003), S. 4.

Zu den schwach dynamischen Systemen gehört die Auslieferung von Heizöl. Pannen- und Reparaturdienste sowie die KEP-Dienste zählen zu den moderat dynamischen Systemen und Notfall- oder Rettungsdienste zu den stark dynamischen. Die Zielfunktion einer dynamischen Problemstellung ist eng mit der Art des dynamischen Systems und der zu erfüllenden Aufgabe verknüpft.³³⁵ So werden bei schwach dynamischen Systemen eher noch die klassischen Zielstellungen wie Minimierung der Fahrtkosten verfolgt, im Gegensatz zu den stark dynamischen Systemen, bei denen das oberste Zielkriterium eine kurze Reaktionszeit bzw. Lieferzeit ist. So zeigt Abbildung 3-18 in der linken unteren Ecke schwach dynamische Systeme, z. B. dynamisches Flottenmanagement und lieferantengesteuerte Lagersysteme, mit dem Zielkriterium Fahrtkostenminimierung und in der linken oberen Ecke die stark dynamischen Systeme, wie Notrufdienste, bei denen ausschließlich die Zeit bis zum Erreichen des Kunden minimiert wird.³³⁶

Durch die Beschäftigung mit der Konzeption neuer Verfahren und mit Handlungsempfehlungen zur Lösung von dynamischen Tourenplanungsproblemen ergeben sich weitere Ideen zur Charakterisierung von dynamischen Systemen bzw. zur Messung deren Dynamik. In die vorgestellten Kennzahlen *edod* und *edod-tw* geht zwar die Länge des Planungshorizontes als Parameter ein, jedoch wird die Länge des Planungshorizontes nicht tatsächlich abgebildet. Folgendes kleines Beispiel verdeutlicht die Problematik. Jeweils drei dynamische Kunden seien gleichmäßig zum einen über einen Planungshorizont von vier Stunden und zum anderen über einen Planungshorizont von acht Stunden verteilt. Im ersten Fall tritt jeweils ein Kunde nach einer Stunde, nach zwei Stunden und nach drei Stunden auf. Im zweiten Fall wird dementsprechend je ein Kunde nach zwei Stunden, nach vier Stunden und nach sechs Stunden bekannt. Sowohl im ersten Fall als auch im zweiten Fall ergibt sich ein *edod* von 0,5:

$$\text{Fall 1: } \frac{\frac{1}{4} + \frac{2}{4} + \frac{3}{4}}{3} = \frac{1}{2}$$

$$\text{Fall 2: } \frac{\frac{2}{8} + \frac{4}{8} + \frac{6}{8}}{3} = \frac{1}{2}$$

Das Verhältnis Auftrittszeitpunkt des dynamischen Kunden zu Länge des Planungshorizontes ist jeweils gleich, jedoch hat der Disponent im zweiten Fall deutlich mehr Planungszeit zur Verfügung.

Eng mit der Länge des Planungshorizontes ist die durchschnittliche Intervallzeit zwischen zwei eingehenden Aufträgen verbunden. Je größer diese ist, desto mehr Zeit bleibt für die Planung. Des Weiteren sollte die Verteilung der Auftragseingänge ausführlicher analysiert

³³⁵ Vgl. Larsen, A. et al. (2002), S. 640.

³³⁶ Vgl. hierzu auch Kapitel 3.3.

werden (vgl. hierzu auch Abb. 3-16). Sind die Intervalle zwischen den Auftragseingängen möglichst homogen, bedeutet dies für den Disponenten eine gleichmäßige Belastung. Hier müssen Erfahrungswerte zeigen, ob diese Belastung eine kontinuierliche Arbeitsweise auf hohem Niveau fördert oder ob der regelmäßige Auftragseingang den Disponenten ständig von anderen Tätigkeiten ablenkt und somit wenig geballte Eingänge von Kundendaten besser wären. Für die Planung von Auftragsbündeln können zeit- oder mengenorientierte Batch-Strategien empfohlen werden.³³⁷ Wird ein gleichmäßiger Dateninput präferiert, kann dieser über die Varianz der Zeitintervalle zwischen zwei Auftragseingängen gemessen werden. Der erhaltene Wert kann als Referenzmaß für zukünftige Perioden dienen oder mit anderen Problemstellungen verglichen werden.

Dass es für die Planung von Vorteil ist, wenn alle Aufträge relativ zeitig eintreffen und der umgekehrte Fall eher nicht, wurde bereits erwähnt. Zu ergänzen bleibt bei letzterem Fall noch, dass das Auftreten von Inputdaten zum Operationsende auch dazu führen kann, dass nicht mehr alle Aufträge am selben Tag erledigt werden können. Selbst ein dynamisches System ist i. d. R. nicht frei von allen zeitlichen Beschränkungen, obwohl bei den 12 Thesen von PSARAFTIS³³⁸ festgehalten ist, dass dynamische Systeme quasi ein offenes Ende haben. Weitere Analysepunkte sind der Bedarf und die geographische Lage jedes dynamischen Kunden. Je höher die Auftragsmenge desto schwieriger ist die Integration des dynamischen Kunden in eine bestehende Tour. Da i. d. R. eine hohe Auslastung der Fahrzeuge durch Tourenplanungsverfahren angestrebt wird, liegen nur geringe Restkapazitäten vor. Im ungünstigsten Fall muss ein weiteres Fahrzeug am Depot starten. Eine nicht vorteilhafte geographische Lage kann geringe Verdienstmöglichkeiten bedeuten oder zu einer geringen für das Unternehmen zur Verfügung stehenden Reaktionszeit führen, da die Reaktionszeit $r_i = l_i - ZP_i$ zusätzlich um die Fahrzeit von einem aktuellen Fahrzeugstandpunkt zum Kunden verringert wird, $r_i = l_i - ZP_i - t_{ij}$ (j = aktueller Fahrzeugstandort). Außerdem ist die Aufnahme eines weit abseits von allen anderen Kunden gelegenen Kunden in eine bestehende Tour, bei der Zeitfensterrestriktionen anderer Kunden zu berücksichtigen sind, aufgrund des großen Umweges (ohne die Restriktionen zu verletzen) schwieriger.

Zusammenfassend können aus den vorangegangenen Erläuterungen einige mathematische

Schlussfolgerungen getroffen werden. Der Ausdruck $\sum_{i=1}^{n_{\text{total}}} (PH - ZP_i)$ sollte möglichst groß sein, damit möglichst alle Aufträge zeitlich nah am Tourstartzeitpunkt liegen und somit eine Erhöhung der Planungssicherheit erfolgt. Ferner ist die Varianz der Zeitintervalle $ZP_{i+1} - ZP_i$

³³⁷ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 86 f.

³³⁸ Vgl. Kapitel 3.1.

(für $i=1$ bis n_{total}) zu minimieren, damit ein gleichmäßiger Auftragseingang vorliegt. Außerdem sollte die Summe der zur Verfügung stehenden Reaktionszeiten $\sum_{i=1}^{n_{total}} r_i$ möglichst einen großen Wert annehmen, um viel Zeit zur Planung zu haben. Ein Äquivalent zur Minimierung der Varianz der Zeitintervalle zwischen zwei Auftragseingängen ist die Minimierung der Varianz der Reaktionszeiten r_i . Abschließend werden in Tabelle 3-5 die wichtigsten Einflussfaktoren zur Beschreibung der Dynamik eines Systems und deren empfohlene Ausprägung zusammengefasst. Die empfohlene Ausprägung soll die Dynamik der Inputfaktoren respektive des Systems für den Disponenten besser beherrschbar machen.³³⁹

Faktor	empfohlene Ausprägung
Verhältnis dynamische vs. statische Kunden	wenig dynamische Kunden
Eingangszeit der Aufträge bzw. Verteilung des Auftragseingangs	frühzeitig, wenn Gesamtfahrstrecke minimiert werden soll; gleichgroße Intervalle, für gleichmäßige Arbeitslast (Zielkonflikt)
Lage der Zeitfenster	weit entfernt von der Auftragseingangszeit (→ große zur Verfügung stehende Reaktionszeit), große Zeitfenster
Länge des Planungszeitraumes	groß, im Verhältnis zur dynamischen Kundenanzahl
zur Verfügung stehende Reaktionszeiten	groß
Varianz der Reaktionszeiten	gering
Kundenbedarf	gering
geographische Lage	nah zu nächstgelegtem Fahrzeug oder nah zu nächstgelegtem Kunden

Tab. 3-5: Einflussfaktoren auf die Dynamik eines Tourenplanungssystem

3.6 Technische Komponenten zur Umsetzung der dynamischen Tourenplanung

Vor dem Hintergrund des Forschungsgegenstandes dieser Arbeit, der dynamischen Tourenplanung, sollen in diesem Abschnitt nutzenstiftende Potenziale und Einsatzmöglichkeiten der Telematik aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der zielgerichteten Ausgestaltung telematikgestützter Informationsketten, da ein effektives Informationsmanagement und eine entsprechende leistungsfähige Informationslogistik Erfolgsfaktoren bei der nachhal-

³³⁹ Um die empfohlene Ausprägung zu erreichen sind entsprechende Maßnahmen notwendig, die es noch zu bestimmen gilt, d. h. hier besteht noch Forschungsbedarf. Ein Ansatz ist z. B. die Bildung von Unternehmensnetzwerken. Hierdurch können Schwankungen bei der Auftragslast besser ausgeglichen werden.

tigen Umsetzung der dynamischen Tourenplanung sind. Bei der operativen Tourendisposition, speziell bei einer sehr hohen Dynamik des Auftragseingangs, ist aufgrund des außerordentlich zeitkritischen Charakters der Einsatz neuer, flexibler und intelligenter Informations- und Kommunikationstechnologien zwingend erforderlich.

Unter **Telematik**, ein durch Verknüpfung der Begriffe Telekommunikation und Informatik entstandenes Wort,³⁴⁰ wird dabei jede Form moderner, computergestützter Telekommunikation verstanden.³⁴¹ Die Sicherstellung der Funktionalität erfolgt i. d. R. durch Software. Inhaltlich verbirgt sich hinter Telematik auch das Zusammenwachsen von Datenerfassung, -übertragung, -speicherung und -verarbeitung. Zum einen ist das harmonische Zusammenspiel dieser vier genannten Teilbereiche für eine effiziente dynamische Tourenplanung elementar. Zum anderen muss jeder einzelne Teilbereich im Rahmen der dynamischen Tourenplanung besonders schnell arbeiten, um die tatsächlichen Reaktionszeiten bzw. die Wartezeiten zu minimieren und aktualisierte Tourenplanungsergebnisse in kürzester Zeit zur Verfügung zu stellen. Telematiksysteme, welche somit komplexe, i. d. R. rechnergestützte Informations- und Kommunikationssysteme sind, ermöglichen dem Benutzer neue kommunikative Beziehungen auch über größere geographische Entfernungen zwischen verschiedenen mobilen Einheiten oder zwischen mobilen Einheiten und zentralen Dispositionsstellen. Zusammenfassend ergibt sich, dass die Bereiche Informatik, Automatisierungstechnik, Telekommunikation einschließlich Mobilkommunikation sowie die Dienste Ortung und Navigation im Rahmen der Telematik interdisziplinär zusammengeführt werden.³⁴²

Die grundsätzlichen Einsatzgebiete von Telematikanwendungen sind Messaging, Sendungsverfolgung, Flottenmanagement, zu dem auch die Fahrzeugortung gehört, Umschlagsdisposition und Fahrzeugnavigation.³⁴³ Die Bereiche Sendungsverfolgung³⁴⁴ und Umschlagsdisposition³⁴⁵ werden nicht weiter betrachtet, da sie in keinem direkten Zusammenhang zur dynamischen Tourenplanung stehen, d. h. sie sind zur Durchführung der dynamischen Tourenplanung nicht zwingend erforderlich.

³⁴⁰ Vgl. Buchholz, J. et al. (1998), S. 223, Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001), S. 115 und Schubert, W. (2000), S. 568.

³⁴¹ Vgl. Lasch, R. et al. (1998), S. 5.

³⁴² Vgl. Pfliegl, R. (1999), S. 347 f. und Schubert, W. (2000), S. 569 f.

³⁴³ Vgl. Andres, M. (2003), S. 11.

³⁴⁴ Sendungsverfolgung ermöglicht die Erfassung und Überwachung des räumlichen und zeitlichen Ablauf eines Transportes. Entsprechende Systeme liefern Informationen über den aktuellen Status einer Sendung. Vgl. Schreiber, A. (2004), S. 79 und Schubert, W. (2000), S. 598. Lösungsansätze und Praxisbeispiele zur Sendungsverfolgung finden sich zum Beispiel in Abele, E. (2002). Vgl. Abele, E. (2002), S. 127 ff.

³⁴⁵ Ein telematisch gestütztes Umschlagsdispositionssystem wirkt unterstützend bei der Planung der Ent-, Be- und Umladevorgänge an den Knotenpunkten im gebrochenen Verkehr mit dem Ziel, eine optimale Steuerung des Güterumschlages zu erreichen. Vgl. Lasch, R. et al. (1998), S. 12.

Als **Messaging** wird die Übertragung von Daten oder Nachrichten zwischen der Dispositionszentrale und den Einsatzfahrzeugen bezeichnet.³⁴⁶ Aufgabe des Messaging ist dementsprechend die Integration von Transportmitteln und Fahrern in die betriebliche Informationskette. Bei Bedarf kann ein sofortiger Datenaustausch zwischen mobilen und stationären Einheiten stattfinden.

Unter dem Begriff **Flottenmanagement** werden die Fahrzeugdisposition, die Fahrzeugortung, die Fuhrparkverwaltung und die Fuhrparkwerkstattverwaltung summiert.³⁴⁷ Die Fahrzeugeinsatzplanung, die vor Start der Fahrzeuge am Depot erfolgt, sowie die Steuerung der Fahrzeugflotte während der Ausführung der geplanten Touren sind Aufgabe der **Fahrzeugdisposition**. Entsprechende Systeme unterstützen den Disponenten bei der Zuweisung von Aufträgen zu Fahrzeugen und bei der Festlegung der Reihenfolge der Stopps innerhalb einer Fahrzeugtour. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit soll das in Kapitel 4 vorgestellte neu konzipierte Tourenplanungssystem den Disponenten sowohl bei der vor Start der Fahrzeuge durchzuführenden statischen Tourenplanung als auch bei der Disposition von dynamischen Kunden, die parallel zur Ausführung des im Vorhinein generierten Tourenplans erfolgt, unterstützen. Die **Fahrzeugortung** dient der automatischen Lokalisierung der einzelnen Fahrzeuge. Gegenstand der **Fuhrparkverwaltung** sind hauptsächlich die Auswertung, Analyse und Aufbereitung von Fahrzeug- und Tourdaten. Die Erfassung dieser Daten führen Fahrzeugdiagnosesysteme und Bordcomputer durch. Historische Daten, die aus der Verwaltung von ausgewerteten, analysierten bzw. aufbereiteten Daten stammen, können zur strategischen Planung, z. B. von benötigtem Personal oder benötigten Fahrzeugen, dienen. Wahrscheinlichkeiten bezüglich des Auftretens der Kunden, wie sie für die in Kapitel 3.4.1 beschriebenen a priori Verfahren notwendig sind, können aus diesen historischen Daten bestimmt werden. Auf die **Fuhrparkwerkstattverwaltung**, die die Terminierung von Wartungsaufträgen bis hin zur Kostenermittlung von außerplanmäßigen Reparaturaufträgen durchführt, wird im Folgenden nicht näher eingegangen, da sie in keinem Zusammenhang mit der dynamischen Tourenplanung steht.

Maßnahmen zur Fahrzeugführung, die Ortungsdaten verarbeiten, werden als **Navigation** (bzw. Fahrzeugzielführung) bezeichnet.³⁴⁸ Zielstellung ist die schnellstmögliche und kostengünstigste Navigation der Fahrzeuge zu ihrem Bestimmungsort unter Beachtung von real-time Informationen bezüglich äußerer Umstände. Idealerweise kann der Disponent Positionsveränderungen seiner Fahrzeugflotte auf einer digitalisierten Straßenkarte verfolgen.

³⁴⁶ Vgl. Lasch, R. et al. (1998), S. 8 f.

³⁴⁷ Vgl. Heiserich, O.-E. (2002), S. 277.

³⁴⁸ Vgl. Bauer, H. (2001), S. 66. Bauer zeigt auch Gerätebeispiele.

Für die nachhaltige Realisierung der dynamischen Tourenplanung unter Einsatz telematischer Komponenten und Systeme aus den zuvor vorgestellten Haupteinsatzfeldern erfolgt in dieser Arbeit die Identifizierung folgender Nutzenerwartungen:

- bessere Beherrschbarkeit der Dynamik (z. B. bei Inputfaktoren)
- Steigerung der Kundenzufriedenheit durch erhöhte Service- und Dienstleistungsqualität (verbesserte Termintreue, Schnelligkeit und Flexibilität sowie ganzheitliche Sendungs- und Auftragsverfolgung)
- Kostenreduzierung
- verbesserte Prozesstransparenz
- Vereinfachung von operativen Abläufen bei der Transportdisposition
- höhere Automatisierung durch Technikeinsatz
- Personaleinsparung
- nachhaltige Entlastung/Zeitersparnis für Disponenten und Fahrpersonal
- effizienteres Flottenmanagement durch eine rechnergestützte dynamische Tourenplanung, -überwachung und Fahrzeugeinsatzplanung
- schnellere Datenübertragung, Vermeidung von Medienbrüchen
- Schaffung einer umfassenden Informationsbasis, Vorlage aktuellerer Informationen, zeitnahe Informationsbeschaffung

Folgende Vorteile der einzelnen Bereiche, die die aufgestellten Nutzenerwartungen erfüllen, können genannt werden: Durch das Messaging ist die Übertragung von Meldungen und Aufträgen von der Dispositionszentrale auf die Bordcomputer der Fahrzeuge (mobile Einheiten) schneller und kostengünstiger möglich. Ferner wird das Informationsmanagement effizienter, da die automatische Speicherung von Daten im Bordcomputer zur Fehlervermeidung bei der Übertragung und zur Aufwandsreduzierung führt, weil schriftliche Notizen überflüssig werden. Auftragsdaten übermittelt der Verlader auf elektronischem Weg. Dadurch stehen alle Daten dem Disponenten bei dynamischen Kunden ohne Zeitverzögerung parallel zum Auftragseingang zur Verfügung. Besonders die unmittelbare Verfügbarkeit aller relevanten Auftragsdaten sowie die schnellstmögliche Übertragung der Tourenplanungsergebnisse im dynamischen Dispositionsprozess an die Fahrzeuge respektive die Fahrer ist entscheidend. Selbst bei teilweise dynamischen und nicht dynamischen Dispositionssystemen entsteht für das Transportunternehmen der Vorteil, dass aufgrund der elektronisch übermittelten Auftragsdaten durch die Verladerschaft der Auftragsannahmeschluss weiter nach hinten verlegt werden kann.

Vorteile, die sich durch Fahrzeugortung und Navigation realisieren lassen, sind die genaue Kenntnis der Fahrzeugpositionen und die dynamische Zielführung. Durch die Auswertung

der Ortungsdaten können dynamische Kunden effizient eingeplant werden. Das System ermittelt bezüglich der Aufnahme des dynamischen Kunden in den Tourenplan das am besten positionierte Fahrzeug mit ausreichender Restkapazität. Eine präzise real-time Ortung ist für die hier vorliegende Arbeit besonders wichtig, da bei den neu entwickelten Verfahren die Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erfolgen kann. Um die Routen ab den aktuellen Fahrzeugpositionen zu ändern, benötigt der Disponent bzw. das rechnergestützte Dispositionssystem zum einen ständig und zeitnah die aktuellen Fahrzeugpositionen und zum anderen muss ein neues Planungsergebnis in sehr kurzer Zeit nach Abfrage der Fahrzeugpositionen erzeugt werden, da sich mit fortschreitender Zeit die in die Planung eingegangenen Fahrzeugpositionen ändern.

Durch die Auswertung von Ortungsdaten sowie Daten von Straßeninformationsdiensten ist die dynamische Zielführung, die andere dynamische Aspekte neben dynamischen Kunden wie dynamische Fahrzeiten (z. B. durch Stau) berücksichtigt, möglich. Für Daten, die von Verkehrsinformationsdiensten zur Verfügung gestellt werden, kann eine Klassifizierung in dynamische und statische Informationen erfolgen:³⁴⁹

- dynamische Informationen
 - Staus und hohes Verkehrsaufkommen
 - Unfälle und Havarien
 - Baustellen
 - Witterungsverhältnisse
 - Veranstaltungen (z. B. große Sportveranstaltungen) und Volksfeste mit Auswirkungen auf den Verkehr
 - Wartezeiten an Grenzübergängen
- statische Informationen
 - tageszeitabhängiges Verkehrsaufkommen zu bestimmten Zeiten an bestimmten Orten
 - Schulferien und Feiertage
 - besondere Bestimmungen (Winterreifenpflicht, Fahrverbote oder Geschwindigkeitsbegrenzungen für bestimmte Fahrzeugklassen zu bestimmten Zeiten oder in bestimmten Bereichen)
 - allgemeine Geschwindigkeitsbeschränkungen
 - Mautgebühren

³⁴⁹ Vgl. Giannopoulos, G.A. (2004), S. 305.

Die verfahrensbasierte Umsetzung dieser dynamischen und statischen bzw. tageszeitabhängigen Aspekte, die überwiegend die Fahrzeiten betreffen, wird in dieser Arbeit nicht weiter vertieft.³⁵⁰

Vorteile, die mit einem durch telematische Komponenten unterstützten Flottenmanagement (bzw. Fahrzeugdisposition und Fuhrparkverwaltung) einhergehen, sind die flexiblere Gestaltung der Touren und Routen entsprechend der Auftrags- und Verkehrslage sowie die situationsgerechtere Disposition der Fahrzeugflotte. Des Weiteren verbessert sich die Kommunikation mit den Kunden (Verladerschaft) aufgrund einer durch Telematik verbesserten Informationsbasis, die aktuelle Daten zu Fahrzeugpositionen, Standzeiten usw. enthält. Da der Disponent ständig valide und aktuelle Informationen über seinen Fuhrpark besitzt, kann er bei einem dynamischen Kundenauftrag dem Kunden sofort mitteilen, ob die Durchführung des Auftrages möglich ist und zu welcher Zeit.

Im Folgenden wird auf einige technische Komponenten detaillierter eingegangen. Für eine optimale Disposition der dynamischen Kunden bei der dynamischen Tourenplanung benötigt der Disponent die genauen Standorte der Fahrzeuge. Für die Positionsbestimmung gibt es mehrere Verfahren, die sich in erster Linie anhand der verwendeten Messmethoden und der erreichbaren Genauigkeit unterscheiden.³⁵¹ Das für die kommerzielle Nutzung bedeutendste Ortungsverfahren ist das Global Positioning System (**GPS**), bei dem der augenblickliche Standort des Fahrzeuges, in Abhängigkeit von dem benutzten System, bis auf wenige Meter genau bestimmt werden kann. Das GPS-System besteht aus 24 Satelliten, die verschiedene Gebiete der Erdoberfläche abtasten.³⁵² Mindestens vier Satelliten müssen den mobilen GPS-Empfänger im Fahrzeug erfassen, um in Kombination mit den gemessenen Signallaufzeiten, der ermittelten Uhrzeitabweichung und der Position der betreffenden Satelliten den augenblicklichen Standort des Fahrzeuges zu bestimmen. Die Preise von Standard-GPS-Geräten sind von anfänglich mehreren 1000 Euro bis heute auf deutlich weniger als 500 Euro gefallen. Neben dem GPS-System existieren noch das vergleichbare russische Global Navigation System (GLONASS) sowie die Satellitenkommunikationssysteme EutelTRACS und Inmarsat-C.³⁵³ In Entwicklung befindet sich das europäische Satellitennavigationssystem Galileo. Es basiert auf 30 Satelliten und einem Netz von Bodenstationen. Empfänger in der Größe eines Handys müssen Signale von mindestens 4 Satelliten empfangen, um ihre Position auf

³⁵⁰ Vgl. hierzu bspw. Sandvoß, E. (2004), S. 1 ff., Fleischmann, B. et al. (2004b), S. 420 ff., Fleischmann, B. et al. (2004a), S. 162 ff. und Ichoua, S. et al. (2003), S. 379 ff.

³⁵¹ Vgl. zu verschiedenen Verfahren Schreiber, A. (2004), S. 41 ff. und Bauer, H. (2001), S. 22 f. Die Koppelortung ist neben der Satellitenortung ein weiteres häufig genutztes Ortungsverfahren.

³⁵² Vgl. Bauer, H. (2001), S. 22 und Lehner, F. (2003), S. 88.

³⁵³ Vgl. Heiserich, O.-E. (2002), S. 271.

wenige Meter genau zu bestimmen. Der Probetrieb soll 2008 mit vier Satelliten starten. 2010/2011 wird voraussichtlich das komplette System verfügbar sein, das für zivile Zwecke entwickelt wird im Gegensatz zum amerikanischen GPS-System und russischen GLONASS-System, welche einer militärischen Kontrolle unterliegen.

Ebenfalls sehr wichtig ist die technische Realisation der Kommunikation bzw. des elektronischen Datenaustauschs zwischen den beteiligten Akteuren, was, wie bereits erwähnt, auch als Messaging bezeichnet wird. Im Bereich der Telekommunikation kann zwischen standardisierter leitungsgebundener Kommunikation und Mobilkommunikation unterteilt werden.³⁵⁴ Die leitungsgebundene Kommunikation kommt bei der Verknüpfung von stationären EDV-Systemen zum Einsatz. Die wichtigsten Beispiele sind das Fernsprechnetz, das Integrated Services Digital Network (ISDN), Breitband-ISDN, Digital Subscriber Line (DSL) sowie das Integrierte Text- und Datennetz (IDN). Bei der dynamischen Tourenplanung kann die leitungsgebundene Kommunikation zum Austausch von Daten zwischen dem Transportunternehmen (Disponent) und den Kunden eingesetzt werden, um dynamische Kundenaufträge inklusive der dazugehörigen Daten schnellstmöglich zu übertragen.³⁵⁵ Im Bereich der Mobilkommunikation ist der **GSM** (Global System for Mobile Communications) der erfolgreichste und international am weitesten verbreitetste Mobilfunkstandard der Welt. Aufgrund der Datenübertragungsrate von 9,6 KBit/s und der verbindungsorientierten Abrechnung ist die GSM-Technologie für die Sprachkommunikation und den SMS-Versand (Short Message System) geeignet.³⁵⁶ Für weitere Anwendungen wie die Übertragung von Bild- und multimedialen Dateien oder das mobile E-Commerce sind höhere Bandbreiten erforderlich, die beispielsweise das UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) leisten kann. Die Mobilkommunikation erfolgt zur Kommunikation und Datenübertragung zwischen der Zentrale (Disponent) und den mobilen Einheiten (Fahrzeuge) und ist zwingende Voraussetzung für die dynamische Tourenplanung. Vorteile der elektronischen Datenübertragung, sei es durch leitungsgebundene Systeme oder durch Mobilkommunikation, sind die durchgängige Verwendbarkeit der Daten und die Beschleunigung des Informationsflusses, welche sich direkt auf die erfolgreiche Umsetzung der dynamischen Tourenplanung auswirken, sowie als indirekte Nutzenaspekte die Reduzierung fehleranfälliger manueller Eingaben, der Vorlauf von Informationen vor der Ware, die Verringerung des Papierbedarfs und die leichtere Daten-

³⁵⁴ Vgl. zu leitungsgebundener Kommunikation und Mobilkommunikation Lublow, R. (1997), S. 42 ff. und Schubert, W. (2000), S. 573 ff. Vgl. speziell zu Mobilkommunikation Lehner, F. (2003), S. 17 ff.

³⁵⁵ Für die Optimierung des Datenaustauschs zwischen den Beteiligten in der Informationskette sind Datenaustauschstandards, wie EDIFACT, eingeführt worden. Vgl. hierzu Buchholz, J. et al. (1998), S. 233 ff., Lublow, R. (1997), S. 54 ff. oder Wannenwetsch, H. (2002), S. 35 ff.

³⁵⁶ Vgl. Schreiber, A. (2004), S. 32.

überprüfbarkeit. Die Abbildung 3-19 zeigt schemenhaft die Realisierung der Kommunikation und Ortung durch GSM und GPS.³⁵⁷

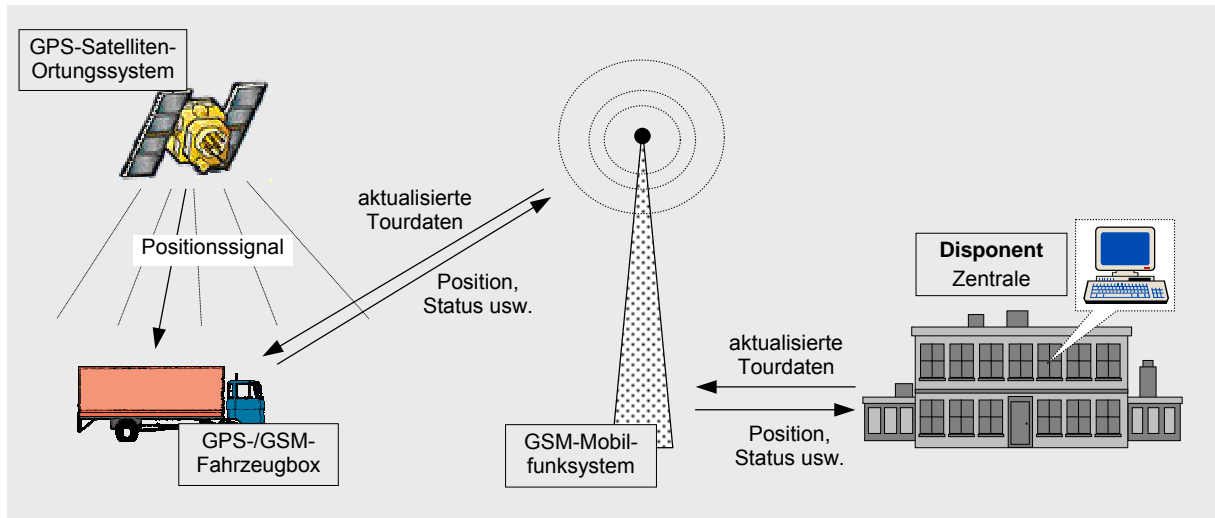


Abb. 3-19: Dispositionssystem auf Basis von GPS und GSM

Quelle: Larsen, A. (2001), S. 14.

In einigen Arbeiten zur dynamischen Tourenplanung wird beschrieben, dass der Fahrer seinen Standort immer dann meldet, wenn er wieder einen Kunden auf seinem Streckenplan abgearbeitet hat.³⁵⁸ Dies kann dabei über Mobilkommunikation erfolgen, ein Ortungssystem wäre in diesem Fall nicht notwendig. Hierbei handelt es sich um Ansätze, bei denen der aktuelle Fahrzeugzug unveränderlich ist. Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept, bei dem die Möglichkeit besteht, das aktuelle Fahrzeugziel zu ändern, muss eine ständige Ab-rufbarkeit der Fahrzeugpositionen über Ortungssysteme gewährleistet werden.

Zur visuellen Aufbereitung von Transportprozessen ist eine spezielle Kategorie von Softwareprodukten entwickelt worden, die **Geographischen Informationssysteme (GIS)**.³⁵⁹ Für jede westliche Industrienation gibt es heute in Folge dieser Entwicklung detaillierte **digitalisierte Straßenkarten**, die vektorisiert sind, da sonst keine Identifikation einzelner Objekte, wie Straßen und Kreuzungen, möglich ist.³⁶⁰ Die digitalisierten Straßenkarten werden sowohl von öffentlicher Hand (Kataster- und Vermessungsämter) als auch von Privatanbietern angeboten. Vor allem bei der Entwicklung für den privaten Bereich erfolgte eine Orientierung an den Bedürfnissen für den Einsatz in der Fahrzeugnavigation. Infolgedessen enthalten die digitalisierten Straßenkarten Angaben über Länge, Art, Verkehrsrichtung und Hausnummern einer Straße sowie Abbiegemöglichkeiten an Straßenkreuzungen.

³⁵⁷ Vgl. hierzu auch Wiechert, A. (2003), S. 192.

³⁵⁸ Vgl. Fleischmann, B. et al. (2004b), S. 422, Lackner, A. (2003), S. 89 und Ichoua, S. et al. (2003), S. 392.

³⁵⁹ Vgl. zu Funktionalitäten und Objekten des GIS Bousonville, T. (2002), S. 94 f.

³⁶⁰ Vgl. hierzu auch Buchholz, J. (1996), S.93 ff. und Wiechert, A. (2003), S. 191.

Ein besonderer Arbeitsschritt ist die sogenannte "Verortung", die immer dann erfolgt, wenn ein neuer Kunde in das Datenverarbeitungssystem des Unternehmens aufzunehmen ist.³⁶¹ Zum Beispiel muss der Disponent den neuen Kunden als Knoten in der digitalisierten Straßenkarte, aus der auch das Tourenplanungssystem Daten entnimmt, anlegen. Meist handelt es sich hier um eine einmalige Aktion, die bei Folgeaufträgen nicht noch einmal durchzuführen ist. Wechseln allerdings die Abhol- oder Lieferadressen sehr oft und hat somit die Verortung häufig zu erfolgen, ist die effiziente Gestaltung dieses Arbeitsschrittes sehr wichtig. Synergien ergeben sich, wenn die Eingabe der Kundendaten nicht nur für einen Teilbereich (z. B. Tourenplanung) isoliert erfolgt, sondern die Daten auch von anderen Bereichen, wie Auftragsabwicklung, genutzt werden. Ziel muss daher die Verknüpfung der Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem sein.

Selbstverständlich ist es in praktischen Anwendungen in einem dynamischen Umfeld essentiell, dass das verwendete Lösungsverfahren große Mengen von diesen geographischen Informationen aus digitalisierten Straßenkarten sehr schnell verarbeiten kann, um das Problem real-time zu lösen. Die Kenntnis der Fahrzeugpositionen sowie die geeignete Darstellung auf einer digitalisierten Straßenkarte am Bildschirm des Dispositionsarbeitsplatzes, was auch als **Mapping** bezeichnet wird, unterstützt den Disponenten entscheidend bei der Fahrzeugdisposition und der Einplanung dynamischer Kunden.

Mobile elektronische Informationssysteme sind weitere technische Komponenten, die zum Einsatz kommen sollten. Hierzu zählen Handterminals, Bordcomputer, Handheld-Computer, Laptops und Notebooks, welche zur Datenverarbeitung in Fahrzeugen und vor Ort beim Kunden dienen.³⁶² Je nach Anwendungsfall erfolgt der Einsatz von Tastaturen, Barcodelesern und anderen Komponenten zur Datenerfassung. Ferner besteht durch die Anwendung von entsprechender Fahrzeugsensorik die Möglichkeit, Fahrzeug- und Ladezustände zu überwachen. Mobile Informationssysteme dienen neben der Datenerfassung auch zur Datenverarbeitung, zum Datenaustausch und zur Informationsbereitstellung.³⁶³

Erfolgt bei der Tourenplanung nur die Zuordnung der Aufträge zu Touren respektive zu Fahrzeugen, kann zur Bestimmung der optimalen Route innerhalb der Touren und zur sicheren Zielführung ein **Navigationssystem** oder **Routenplanungsprogramm** genutzt werden. Navigationssysteme bestehen aus einer Komponente zur Positionsbestimmung des Fahrzeuges und dem Navigationscomputer, der die beste Route zum Ziel ermittelt. Sie nutzen als

³⁶¹ Vgl. Buchholz, J. et al. (1998), S. 237.

³⁶² Vgl. Andres, M. (2003), S. 6.

³⁶³ Vgl. Buchholz, J. et al. (1998), S. 228.

Grundlage eine digitale Straßenkarte, mit komprimierten Vektordaten auf CD-ROM.³⁶⁴ Navigationssysteme sind in den Fahrzeugen installiert, im Gegensatz zu Routenplanungsprogrammen, die auf einem Rechner in der zentralen Disposition arbeiten. Die zentral durch Routenplanungsprogramme bestimmten Ergebnisse müssen nach ausgeführter Planung an die Fahrzeuge weitergeleitet werden. Bei der Routenbestimmung durch Navigationssysteme oder Routenplanungsprogramme erfolgt die Berücksichtigung von Restriktionen wie Einbahnstraßen und Abbiegeverbote. Dynamische Daten, wie Verkehrsstörungen und Staus, Baustellen oder Veranstaltungen mit Auswirkungen auf den Verkehr, fließen heutzutage noch zu selten in die Planung bzw. Transportdisposition ein.³⁶⁵ Voraussetzung für eine dynamische Planung ist das Vorliegen entsprechender zeitnaher Verkehrsinformationen. Navigations- bzw. Zielführungssysteme bieten sich vor allem bei häufig wechselnden Touren oder Fahrern an.³⁶⁶

Verkehrsnachrichten bzw. -informationen bieten der klassische Verkehrsfunk, das **RDS/TMC** (Radio Data System/ Traffic Message Channel), das **DAB** (Digital Audio Broadcasting) und verschiedene Service-Provider via Mobilfunk an.³⁶⁷ Der klassische Verkehrsfunk, der nur sprachbasiert, halbstündlich und zeitverzögert gesendet wird, ist für die Lieferung von real-time Verkehrsinformationen in einem weiterverarbeitungsfähigen Format ungeeignet. Das RDS/TMC und das DAB sind hierzu besser nutzbar. Das TMC, welches ein gebührenfreies Unterprogramm des digitalen Datenübertragungsverfahrens RDS im UKW-Rundfunknetz ist, strahlt aktuelle Verkehrsmeldungen in codierter Form aus.³⁶⁸ Zum Empfang, der Decodierung, der Speicherung und der Wiedergabe der Daten muss das Autoradio mit einem RDS-TMC-Decoder und einer TMC-Chipkarte ausgestattet sein. Das RDS/TMC weist als Vorteile die ständige Verfügbarkeit und die räumliche Selektion der Daten sowie aufgrund der Vorlage der Informationen in digitalem Format die Möglichkeit der direkten Weiterverarbeitung durch Navigationssysteme auf. Nachteilig wirkt sich beim RDS/TMC die geringe Datenübertragungsrate von 250 Bit/s im Vergleich zu 1,5 MBit/s beim DAB aus. Das DAB ist ein auf digitalen Hörfunksignalen basierendes System, bei dem aufgrund der höheren Datenübertragungsrate jederzeit auch Text- und Bewegtbild-Informationen, wie beispielsweise regionale Kartenausschnitte und Abfertigungszeiten an Grenzübergängen, abgerufen werden können. Obwohl das DAB eine deutlich bessere Übertragungsqualität (kristallklarer Radioempfang) aufweist, konnte es den etablierten analogen Hörfunk noch nicht ver-

³⁶⁴ Vgl. Schubert, W. (2000), S. 591.

³⁶⁵ Fleischmann, B. et al. (2004) befassen sich mit der Nutzbarmachung und Verwendung von Daten aus Verkehrsinformationssystemen für Tourenplanungsalgorithmen. Vgl. Fleischmann, B. et al. (2004a), S. 162 ff.

³⁶⁶ Vgl. Wannenwetsch, H. (2002), S. 175.

³⁶⁷ Vgl. Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001), S. 117 und Bauer, H. (2001), S. 14 ff.

³⁶⁸ Vgl. Meusemann, B. (1996), S. 51.

drängen.³⁶⁹ Das liegt auch daran, dass die in Verbindung mit DAB stehenden Funktionalitäten bei gewerblichen Telematikanwendungen so oder in vergleichbarer Art und Weise in alternativen Endgeräten bzw. Diensten zweckmäßiger und effizienter bereitgestellt werden können.

Neben der Übermittlung von Verkehrsinformationen per Rundfunk bieten zunehmend privatwirtschaftliche Organisationen, wie die großen Automobilclubs (z. B. ADAC oder AvD) oder die Gesellschaft für Verkehrsdaten³⁷⁰, aktuelle Daten kommerziell per Mobilfunk (Übertragung vorwiegend per SMS; einmalige oder fortlaufende Benachrichtigung) oder per Internet an. Des Weiteren ist zu ergänzen, dass nicht nur On-Trip-Informationen, die den Fahrer während seiner Fahrt erreichen, existieren, sondern auch Pre-Trip-Informationen, die der Fahrer bereits vor Fahrtantritt abrufen kann. Dabei handelt es sich z. B. um Stauinformationen, Informationen zum Verkehrsaufkommen in ausgewählten Ballungsgebieten, Wartezeiten an Grenzübergängen, Angaben zu Baustellen oder Befahrbarkeit von Gebirgspässen.

Nur die enge Verzahnung aller Teilbereiche (Messaging, Fahrzeugdisposition, Fahrzeugortung, Navigation) ermöglicht die ganzheitliche erfolgreiche Umsetzung der dynamischen Tourenplanung.³⁷¹ Durch das Zusammenspiel der Telematikkomponenten, wie beispielsweise Bordcomputer, Satellitenkommunikationssysteme oder Navigationshilfen, können Vorteile wie effizientere Gestaltung von Prozessen, Vermeidung von Schnittstellenproblemen, Reduzierung der Leerfahrten, Prozesskostensenkung oder kürzere Zeiten bei der Auftragsabwicklung erreicht werden. Im Rahmen dieser Arbeit können natürlich nicht alle Aspekte der Dynamik abgedeckt werden. Insbesondere erfolgt die Auseinandersetzung mit der induzierten Dynamik, die aus dem Eingang neuer Kunden während der Ausführung des Tourenplans resultiert. Dazu ist, wie bereits erwähnt, die ständige Kenntnis der Fahrzeugpositionen notwendig, d. h. ein Ortungssystem muss zum Einsatz kommen. Diese Fahrzeugpositionen gehen in das in Kapitel 4 durch den Autor vorgestellte neu konzipierte Verfahren ein. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das entwickelte Verfahren keine dynamischen Fahrzeiten. Die Einbeziehung von aktuellen Verkehrsinformationen, wie zuvor beschrieben, in Kombination mit Daten bezüglich dynamischer Kunden sind visionär, hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

³⁶⁹ Vgl. Krampe, H./ Lucke, H.-J.(2001), S. 117.

³⁷⁰ Vgl. www.ddg.de.

³⁷¹ Aktuelle Marktübersichten zu Telematikkomplettlösungen oder zu Telematikteillösungen bzw. einzelnen Komponenten sind beispielsweise in den Zeitschriften Eurocargo und Transporting zu finden. Vgl. Transporting (2004a), S. 21, Transporting (2004b), S. 14 f., Eurocargo (2004a), S. 16 und Eurocargo (2004b), S. 35.

Abbildung 3-20 zeigt zusammenfassend wichtige Informationsflüsse im dynamischen Planungs- und Dispositionsprozess. Der Disponent bekommt bei der dynamischen Tourenplanung ständig neue Daten, die zu verarbeiten sind.³⁷² Solche Daten sind zum einen die über den Kunden bekannten Auftragsdaten (Standort, Menge) oder gemeldete Änderungen seitens des Kunden (Zeitfensteränderung, Mengenänderung), zum anderen Informationen über den Status der Ausführung der Touren (Fahrzeugposition, Erledigung eines Auftrages) und damit einhergehende Unregelmäßigkeiten wie Stau oder Defekt von Fahrzeugen. Zusätzlich können noch Daten über die Verkehrssituation auf Straßen oder Autobahnen sowie allgemein über die Wetterverhältnisse von entsprechenden Institutionen herangezogen werden. Die Dispositionszentrale leitet ihrerseits die Planungsergebnisse an die Fahrzeuge weiter oder versucht Probleme, wie z. B. die Verschiebung von Zeitfenstern, im Dialog mit dem Kunden zu lösen. Ferner kann die Dispositionszentrale Daten über tageszeitabhängige Fahrzeiten speichern und aufbereiten, um exaktere Fahrzeiten zu bestimmen, damit Kundenzeitfenster verlässlich eingehalten werden. Ähnliches gilt für die Speicherung von Kundendaten, denn anhand vergangener Kundendaten (z. B. Erwartungswert der dynamischen Kunden pro Tag) kann die erforderliche Kapazität des Fuhrparks prognostiziert werden.

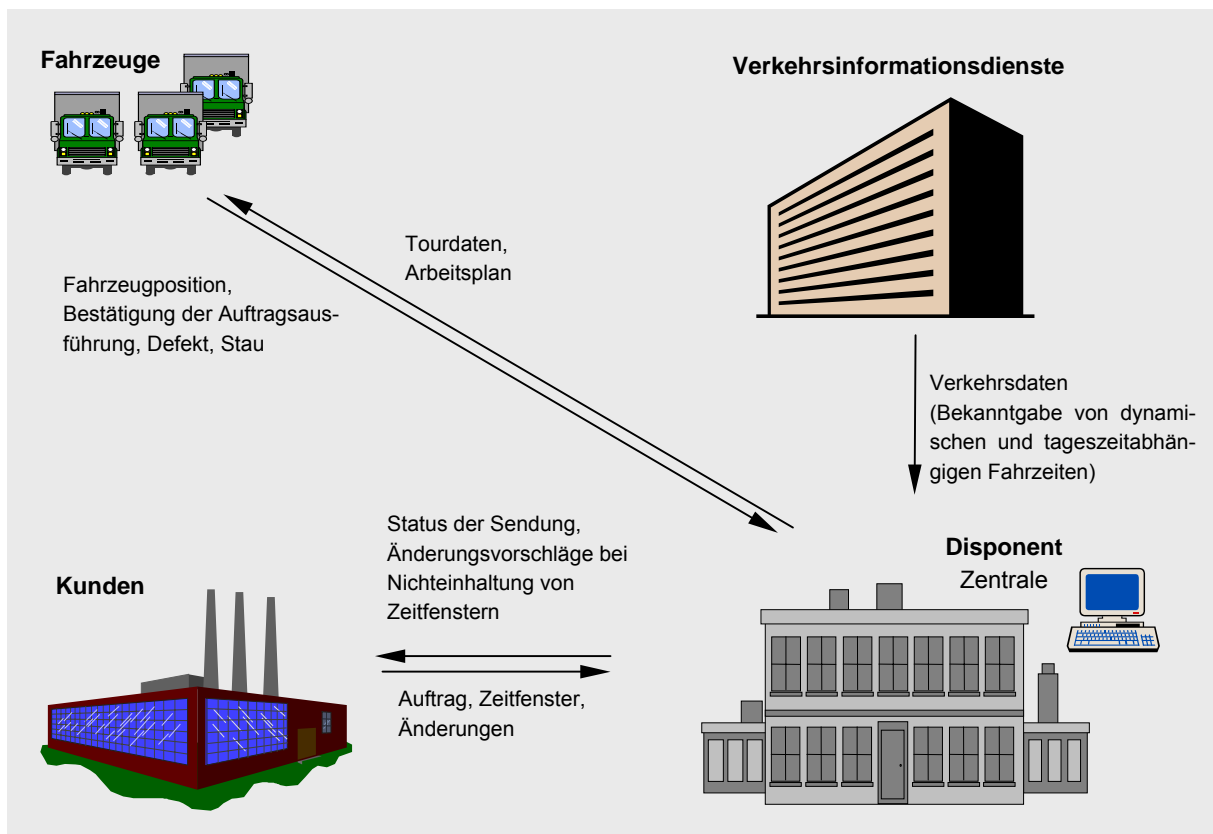


Abb. 3-20: Informationsflüsse im Planungs- und Dispositionsprozess

³⁷² Die effiziente Übermittlung der Auftragsdaten wird in dieser Arbeit nicht weiter vertieft. Lösungsansätze hierzu bzw. potentiell auftretende Problemfelder beschreibt Abele, E. (2002). Vgl. Abele, E. (2002), S. 122 ff.

Als technische Mindestausstattung für die Umsetzung der dynamischen Tourenplanung, wie sie in dieser Arbeit beschrieben wird, kann Folgendes empfohlen werden: Die Anschaffung von GPS-Ortungsgeräten einschließlich Bordcomputern in den Fahrzeugen ist zur Ermittlung der geographischen Position der Fahrzeuge notwendig. Allerdings ist dies für kleinere und mittlere Unternehmen meist zu kostspielig. Für diese Zielgruppe gibt es ein breites Angebot an Handy-Lösungen.³⁷³ Hier werden Statusmeldungen per SMS versendet oder empfangen. Ein wenig teurer aber dafür auch komfortabler sind sogenannte Handheld-Geräte- bzw. PDA-Lösungen. Ferner ist der Erwerb bzw. die Entwicklung einer Tourenplanungssoftware notwendig, die diese Daten verarbeiten kann sowie das Auftreten dynamischer Kunden berücksichtigt. Zudem muss die Übertragung der Planungsergebnisse zu den Fahrern sichergestellt werden. Aktuelle Übersichten zu Hardware- und Softwarelösungen sowie deren Anbietern und Preisen enthalten Branchenzeitschriften wie EUROCARGO oder TRANSPORTING.³⁷⁴

³⁷³ Vgl. Eurocargo (2004a), S. 17.

³⁷⁴ Vgl. bspw. Eurocargo (2004a), S. 14 ff., Transporting (2004a), S. 20 f. und Transporting (2004b), S. 12 ff.

4 Entwicklung von Verfahren zur dynamischen Rundreise- und Tourenplanung

Die den meisten klassischen Verfahren zu Grunde liegende Annahme, dass zu Beginn der Planung alle Daten (Auftragsdaten, Fahrzeuginformationen, Straßenzustandsinformationen usw.) für die Planungsperiode komplett vorliegen, trifft in der Praxis selten zu. Üblicherweise ist der Auftragseingang dynamisch über den ganzen Tag verteilt, vor allem vormittags gehen noch viele Aufträge ein. Ein entscheidendes Leistungs- und damit auch Wettbewerbskriterium einer Spedition oder eines Transporteurs stellt die schnellstmögliche Bedienung des Kundenauftrages dar, am besten noch am gleichen Tag innerhalb weniger Stunden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen muss eine dynamische Rundreise- oder Tourenplanung erfolgen. Das Planungsproblem, welchem sich der Disponent gegenüber sieht, ist ferner aufgrund der hohen Anforderungen durch eine kurze Reaktions- und Planungszeit charakterisiert.

Im Rahmen dieses Kapitels, dem Kernstück der Arbeit, wird die Lösung dynamischer Rundreise- und Tourenplanungsprobleme unter Anwendung neu entwickelter Verfahren behandelt. Zuerst erfolgt die Vorstellung eines rollierenden Planungskonzeptes, welches das dynamische Gesamtproblem (das dynamische Rundreise- oder Tourenplanungsproblem) löst. Jede einzelne Planung des rollierenden Planungskonzeptes stellt ein Teilproblem dar, das bei Auftreten eines neuen dynamischen Kunden entsteht. Zur Beschreibung der Teilprobleme wird sowohl für das dynamische Rundreiseproblem als auch für das dynamische Tourenplanungsproblem ein Modell präsentiert. Danach findet die Vorstellung neuer heuristischer Verfahren zur Lösung der Teilprobleme statt. Einschränkend muss erwähnt werden, dass in dieser Arbeit nur die Betrachtung der Dynamik bezüglich der Anzahl der zu bedienenden Kunden erfolgt. Ein dynamischer Kunde ist aus Vereinfachungsgründen mit einem dynamischen Kundenauftrag gleichzusetzen, d. h. einem Kunden können nicht mehrere Aufträge zugeordnet werden. Zu der hier analysierten dynamischen Tourenplanungsproblemstellung ist zu ergänzen, dass es sich um ein kapazitiertes dynamisches Tourenplanungsproblem handelt. Allerdings erfolgt nur die Betrachtung von Problemen, bei denen das Einsammeln von Gütern oder das Ausliefern von homogenen Gütern (z. B. Heizöl) stattfindet. Die dynamische Tourenplanung für das Ausliefern eines heterogenen Güterspektrums ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ein weiterer Anwendungsbereich besteht in der dynamischen Planung von Monteurstouren, da hierbei keine zusätzlichen Güter im Voraus mitgenommen werden müssen. Zudem ist die in der Arbeit betrachtete Problemstellung dadurch gekennzeichnet, dass sich ein homogener Fuhrpark mit beschränkter Kapazität je Fahrzeug in einem Depot befindet, ein Bedarf je Kunde vorliegt sowie keine Prognosedaten über den Auftrittszeitpunkt und über die Höhe der Bedarfsmenge der dynamischen Kunden bekannt

sind. Allerdings müssen bei Lösung jedes Teilproblems ein heterogener Fuhrpark und verschiedene Startpunkte (Startdepots) berücksichtigt werden. Bei der dynamischen Rundreiseplanung sind keine Bedarfe und Kapazitäten zu beachten.

Hauptgrund für die Entwicklung heuristischer Verfahren war die Forderung nach kurzen Rechenzeiten bei der Lösung von dynamischen Rundreise- und Tourenplanungsproblemen.³⁷⁵ Gerade bei praxisrelevanten Problemgrößen weisen exakte Verfahren inakzeptable Rechenzeiten auf, da das dynamische Rundreise- und Tourenplanungsproblem zur Klasse der NP-schweren Probleme gehört.³⁷⁶ Die Heuristiken sollen dementsprechend den Anforderungen gerecht werden, dass sie große Planungsprobleme bei kurzen Rechenzeiten lösen und eine gute Lösungsqualität gewährleisten.³⁷⁷ Ferner sprechen für eine heuristische Lösung die Komplexität der Problemstellung, eine höhere Flexibilität bei praxisrelevanten Erweiterungen sowie die geringen Interaktionsmöglichkeiten bei exakten Verfahren, die mangelnde Nachvollziehbarkeit und eine schlechtere Anpassungsfähigkeit von exakten Verfahren.³⁷⁸

Das Kapitel gliedert sich in Grundlagen und prinzipieller Ablauf der neu konzipierten dynamischen Rundreise- und Tourenplanungsverfahren (Kapitel 4.1), Modell und Verfahren zum Dynamic Traveling Salesman Problem (DTSP) (Kapitel 4.2), Modell und Verfahren zum Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP) (Kapitel 4.3), Zielkonflikt zwischen Minimierung der Tourlänge und der Wartezeit (Kapitel 4.4) sowie Durchführung numerischer Tests (Kapitel 4.5). Kapitel 4.1 behandelt die allgemeine Beschreibung des Dispositionsablaufs der dynamischen Rundreise- und Tourenplanung, d. h. es wird bspw. die Zerlegung des dynamischen Gesamtproblems in einzelne Teilprobleme erklärt. Außerdem erfolgt ein Vergleich zwischen globalen und lokalen Lösungsverfahren sowie die Erklärung, warum im Rahmen der Arbeit die neu entwickelten Heuristiken anhand der Lösungsgüte für das dynamische Gesamtproblem und nicht anhand der Lösungsgüte für ein einzelnes Teilproblem verglichen werden. In den Kapiteln 4.2 und 4.3 erfolgt jeweils zuerst die Formulierung der Modelle, die den Teilproblemen zugrunde liegen. Daran anschließend werden Lösungsverfahren für das dynamische Rundreiseproblem und für das dynamische Tourenplanungsproblem vorgestellt. Des Weiteren erfolgt in Kapitel 4.2 die Erläuterung, dass sowohl eine Heuristik, die die Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges enthält, als auch eine Heuristik, bei der dies verboten ist, bei einem Testbeispiel das beste Ergebnis erzielen kann, da es sich jeweils um ein heuristisches Lösungsverfahren handelt. Kapitel 4.4 erörtert zwei Zielfunktionen, die

³⁷⁵ Vgl. Psaraftis (1988), S. 229 und Vogt, M. (1998), S. 112.

³⁷⁶ Vgl. Kapitel 2.5.

³⁷⁷ Vgl. Funke, B. (2003), S. 2 f.

³⁷⁸ Vgl. Stumpf, P. (1998), S. 172.

durch die vorgestellten Heuristiken minimiert werden können. Die eine verfolgt die Minimierung der Gesamtlänge aller Touren und die andere die Minimierung der Wartezeit über alle Kunden. Dabei liegt ein Zielkonflikt zwischen beiden Zielstellungen vor, der in Kapitel 4.4 näher untersucht wird. Kapitel 4.5 erläutert den Ablauf der numerischen Tests, stellt die programmierte Testsoftware vor, wertet die Testergebnisse aus und befasst sich mit einigen praktischen Umsetzungshinweisen bei der Anwendung der vorgestellten Heuristiken.

4.1 Grundlagen und prinzipieller Ablauf der neu konzipierten dynamischen Rundreise- und Tourenplanungsverfahren

Die durch den Autor neu entwickelten Algorithmen zur dynamischen Rundreise- und Tourenplanung kommen, wie die in Kapitel 3.4.2 vorgestellten Verfahren zur Lösung von Teilproblemen, im Rahmen einer rollierenden Planung³⁷⁹ zur Anwendung. Dabei erfolgt die Zerlegung des Gesamtproblems in einzelne Teilprobleme, welche separat gelöst werden. Ein solches Teilproblem tritt immer dann auf, wenn ein oder mehrere dynamische Kunden hinzukommen. In diesem Zusammenhang wird hier die Single Event Optimization (SEO) - Strategie³⁸⁰ angewendet. Da bei der dynamischen Tourenplanung im Zeitablauf wiederholt neue Daten bekannt werden, muss die Planung aktualisiert bzw. neu ausgeführt werden. Aus diesem Grund erfolgt hier die Anwendung einer rollierenden Planung.

Die in der vorliegenden Arbeit durch den Autor neu konzipierten Modelle und Verfahren können in Anlehnung an Kapitel 2.3 (Seite 19) anhand der in Tabelle 4-1 dargestellten Kriterien charakterisiert werden. Diese Eigenschaften gelten sowohl für das neue Verfahren zum dynamischen Tourenplanungsproblem als auch für die neuen Verfahren zum dynamischen Traveling Salesman Problem. Eine Abweichung gegenüber dem klassischen Tourenplanungsproblem liegt bei Art und Daten in der Rubrik Aufträge, bei Zusammensetzung und Standort in der Rubrik Fuhrpark, bei Art in der Rubrik Planungshorizont sowie bei Art in der Rubrik Touren vor.³⁸¹ Überblicksartig werden nun kurz die einzelnen Merkmale der Tabelle 4-1 erläutert. Zusätzlich wird auch detailliert auf die Unterschiede zwischen dynamischem Tourenplanungsproblem und dynamischem Traveling Salesman Problem an den entsprechenden Stellen eingegangen.

³⁷⁹ Bei der rollierenden Planung ist der Planungsabstand geringer als der Planungszeitraum. Vgl. Thommen, J.-P./ Achleitner, A.-K. (2003), S. 773 und Domschke, W./ Scholl, A. (2002), S. 30.

³⁸⁰ Vgl. Kapitel 3.4.2.

³⁸¹ Vgl. Kapitel 2.3.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Art der Problemstellung, wie bereits in der Einleitung erwähnt, entweder um das reine Einsammeln von Gütern oder um das reine Ausliefern von homogenen Gütern wie Heizöl oder ähnlichem. In Kapitel 3.1 wurde bereits erklärt, dass aufgrund der Dynamik der Problemstellung nur solche Auslieferungsprobleme mit den hier in der Arbeit präsentierten Verfahren gelöst werden können, bei denen aufgrund der Gleichartigkeit der Güter, das Fahrzeug von vornherein mehr Güter mitnehmen kann, als anfänglich benötigt werden, um gegebenenfalls dynamische Kunden bedienen zu können ohne zusätzlich das Depot aufsuchen zu müssen. Beim dynamischen Traveling Salesman Problem spielt diese Überlegung keine Rolle, da keine mengenmäßigen Kundenbedarfe zu berücksichtigen sind.

Aufträge	
Art	nur Einsammeln oder nur Ausliefern
Standort	auf Knoten (knotenorientierte Tourenplanung)
Daten	dynamisch
zeitliche Einschränkung	freie Belieferungszeit
Teilbarkeit	nicht teilbare Lieferung
Auftragsgröße	Teilladung
Transportobjekt	Güter
Reihenfolge der Aufträge	beliebig
Auswahl der Aufträge	Durchführung aller Aufträge
Häufigkeit der Aufträge	einmalig
Fuhrpark	
Größe	unbegrenzte Fahrzeuganzahl
Zusammensetzung	Gesamtproblem: homogen (ein Fahrzeugtyp); Teilprobleme: heterogen
Standort	Gesamtproblem: ein Depot; Teilprobleme: verschiedene Standorte
Einsatzhäufigkeit	Einfacheinsatz
Zeitrestriktion	keine Beschränkung
Zugrundeliegendes Netzwerk	
Daten	symmetrisch (ungerichteter Graph)
Art des Netzwerkes	Koordinatennetz (euklidische Distanzen)
Fahrzeiten	konstant
Planungshorizont	
Länge	unendlich (d. h. keine feste Vorgabe)
Art	rollierend
Touren	
Art	geschlossene Touren (allerdings verschiedene Startpunkte, wenn ein Teilproblem gelöst wird); individuelle Touren
Zielsetzung	
	Minimierung der gesamten Tourlänge

Tab. 4-1: Merkmale des in dieser Arbeit betrachteten Tourenplanungsproblems

Weiterhin gilt, dass es sich um eine knotenorientierte Problemstellung handelt, bei der die Anzahl der Kunden dynamisch ist. Kundenzeitfenster werden nicht berücksichtigt. Ferner liegen nicht teilbare Aufträge vor, deren Reihenfolge innerhalb einer Tour beliebig ist. Ein Auftrag füllt i. d. R. ein komplettes Fahrzeug nicht aus, daher handelt es sich um Teilladungen und keine Komplettladungen. Die Transportobjekte der Aufträge stellen Güter dar. Des Weiteren beinhalten die Aufträge keine periodisch auszuführenden Lieferungen oder Abholungen von Waren, d. h. ein Auftrag hat eine einmalig durchzuführende Leistung zum Gegenstand. Eine Auswahl welche Aufträge auszuführen sind und welche nicht, leisten die neuen Verfahren zur dynamischen Rundreise- und Tourenplanung nicht. Dies muss im Vorhinein geklärt werden. Hier erfolgt die Annahme, dass alle Kunden zu bedienen sind. Eine Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit kann insofern erfolgen, dass im Voraus im Rahmen einer strategischen Planung fixe Preise für die Bedienung der Kunden festgelegt werden, die bei Akzeptanz durch den Kunden zum Gewinn des Unternehmens beitragen. Außerdem führt die Bedienung aller Kunden, sofern sie den Preis der Leistung akzeptieren, zu einem hohen Lieferservicegrad. Als Letztes sei zur Rubrik Aufträge noch zu ergänzen, dass ein Kundenauftrag einen einmaligen Leistungswunsch enthält.

Den Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass ein homogener Fuhrpark mit unbegrenzter Fahrzeuganzahl vorhanden ist. Bei dynamischen Traveling Salesman Problemen spielt die Größe und Zusammensetzung respektive die Fahrzeugkapazität keine Rolle, da mengenmäßige Bedarfe nicht zu berücksichtigen sind, sondern nur die Bedienung des Kunden an sich zu erfüllen ist. Die Erweiterung für einen heterogenen Fuhrpark ist insofern einfach, da die Teilprobleme, in die das dynamische Gesamtproblem der Tourenplanung zerlegt wird, bereits einen heterogenen Fuhrpark berücksichtigen. Kommt ein dynamischer Kunde hinzu, liegt ein Teilproblem mit heterogenem Fuhrpark vor, da die Fahrzeuge sich auf Tour befinden und bereits unterschiedlich viele Kunden bedient haben. Außerdem gilt, dass der gesamte Fuhrpark in einem Depot stationiert und keine maximale Einsatzzeit je Fahrzeug zu beachten ist. Ferner wird kein Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen vorgenommen.

Das der Optimierung zugrundeliegende Netzwerk ist ein vollständiger ungerichteter Graph, der auf Basis der Koordinatennetzmethode, d. h. über euklidische Distanzen, bestimmt wird. Eng mit dem zugrundeliegenden Netzwerk sind die Fahrzeiten zwischen den einzelnen Knoten des Netzwerkes verbunden, welche als konstant angenommen werden. Die Planung erfolgt rollierend, wie das Konzept aus Abbildung 4-1 zeigt, da bei bekannt werden eines dynamischen Kunden sofort eine neue Planung stattfindet. Des Weiteren liegt ein unendlicher Planungshorizont vor, da dieser durch die Verfahren nicht begrenzt wird. Bei der Planung werden stets geschlossene Touren mit einem festen Startpunkt und einem festen

Endpunkt generiert. Es erfolgt entsprechend der momentanen Situation die Bildung von individuellen Touren, d. h. es werden keine Standardtours benutzt. Einzige in diesem Kontext zu erwähnende Besonderheit ist, dass die Touren i. d. R. verschiedene Startpunkte besitzen, da die Fahrzeuge sich bei der jeweiligen Lösung eines Teilproblems des dynamischen Gesamtproblems an unterschiedlichen Positionen befinden. Schließlich wird als Zielstellung die Minimierung der gesamten Tourlänge verfolgt, da gerade diese Zielstellung sich bei einer schwankenden Nachfrage nach Transportleistungen wie bei der dynamischen Tourenplanung besonders gut eignet.³⁸²

Bevor in Kapitel 4.2 und 4.3 konkrete Verfahren zur Lösung der Teilprobleme vorgestellt werden, erfolgt zunächst die Darstellung des allgemeingültigen Planungsablaufes zur Lösung des dynamischen Gesamtproblems (vgl. Abbildung 4-1). Bei diesem Konzept handelt es sich um eine rollierende Planung.

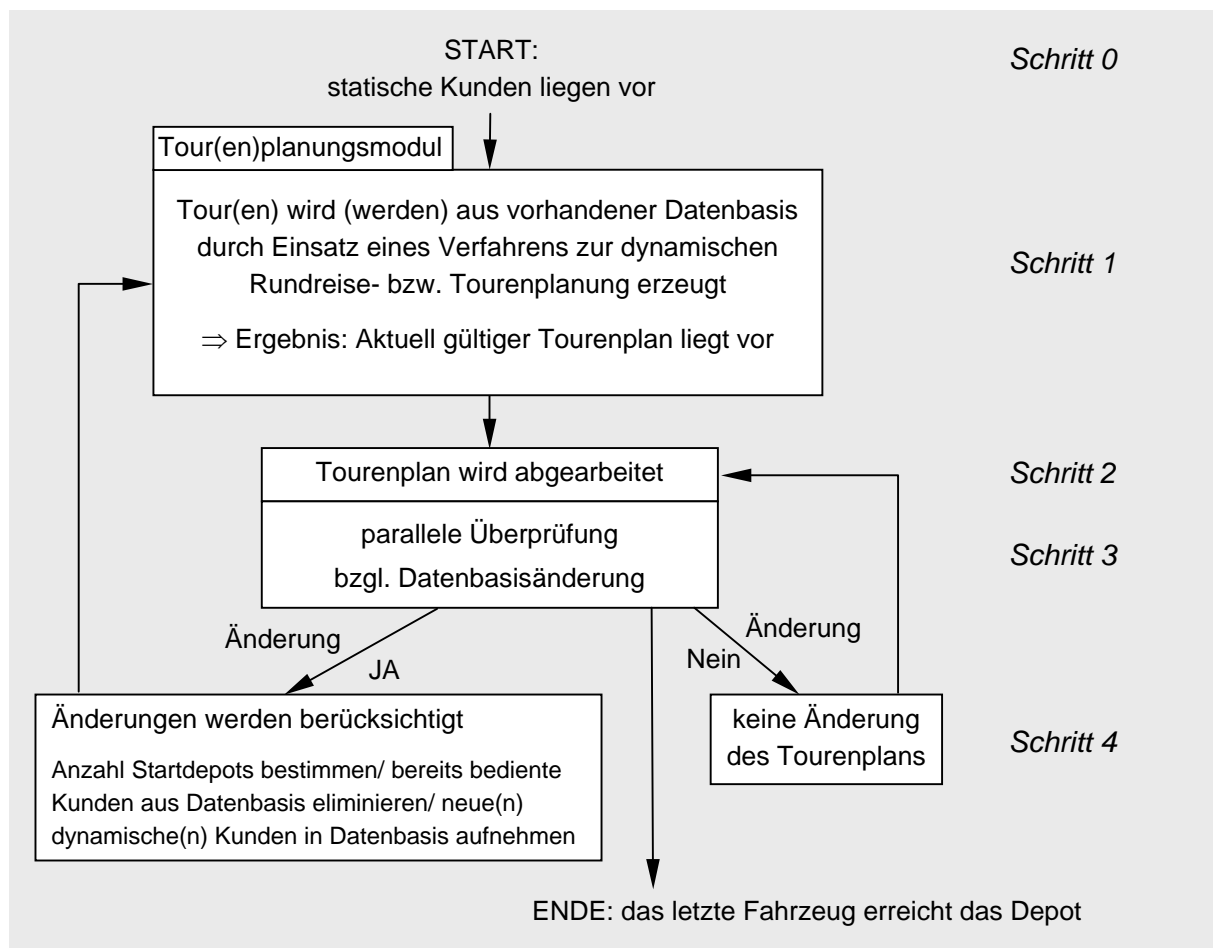


Abb. 4-1: Ablaufschema der dynamischen Rundreise- bzw. Tourenplanung
(In Ahnlehnung an Lund, K. et al. (1996), S. 6.)

³⁸² Vgl. dazu Kapitel 2.4.

Vor Beginn des Planungszeitraumes liegen statische Kunden vor. Diese werden aufbereitet (Schritt 0) und bilden die Grundlage für Schritt 1 - das Tour(en)planungsmodul.³⁸³ Ergebnis von Schritt 1 ist immer der aktuell gültige Rundreise- bzw. Tourenplan, welcher in Schritt 2 bis zur nächsten Unterbrechung, d. h. ständig erfolgt die Überprüfung, ob dynamische Kunden hinzugekommen sind (Schritt 3), umgesetzt wird. Als Ergebnis von Schritt 3 steht entweder fest, dass sich die Datenbasis geändert hat oder nicht. Ist Letzteres der Fall, erfolgt die Fortsetzung der Umsetzung des Rundreise- bzw. Tourenplans (Schritt 2), sonst bewirkt Schritt 4, dass die neue Datenbasis als Grundlage für die erneute Anwendung des Rundreise- bzw. Tourenplanungsmoduls geschaffen wird. Dazu muss die Menge der noch zu beliefernden Kunden um die Anzahl der neuen dynamischen Kunden erweitert werden, bereits bediente Kunden sind zu löschen und die aktuellen Fahrzeugpositionen, als Startpunkte oder Startdepots bezeichnet, gehen ebenfalls als Input ein. Danach folgt wieder Schritt 1, das Rundreise- bzw. Tourenplanungsmodul, damit ein neuer Tourenplan generiert wird, der die neuen Kunden bestmöglich berücksichtigt. Das dynamische Tourenplanungsproblem ist gelöst bzw. das rollierende Planungskonzept beendet, wenn das letzte im Einsatz befindliche Fahrzeug das Depot erreicht.

Im ersten Planungslauf (erstes Teilproblem) erfolgt nur die Planung für die statischen Kunden. Das Ziel aller weiteren Planungen (folgende Teilprobleme) im rollierenden Planungsprozess bei der dynamischen Rundreiseplanung ist, unter Zuhilfenahme einer entsprechenden Methode für jedes Teilproblem eine Tour so zu konstruieren, dass sie an der aktuellen Fahrzeugposition startet und am Depot endet. Dabei ist jeweils die aktuell bekannte Datenbasis zu berücksichtigen. Die Abbildung 4-2 zeigt, wie aus dem dynamischen Gesamtproblem bei Auftritt eines dynamischen Kunden ein statisches Teilproblem extrahiert wird. Um 10:00 Uhr geht der neue dynamische Kundenauftrag ein. Die linke Grafik zeigt eine Momentaufnahme des dynamischen Gesamtproblems um 10:00 Uhr. Sie stellt alle Kunden des Gesamtproblems und die bis 10:00 Uhr durch das Fahrzeug zurückgelegte Strecke dar. Das Fahrzeug ist um 8:00 Uhr am Depot gestartet. Die graugefärbten Kunden wurden bereits bedient. Hierbei kann es sich um statische oder auch dynamische Kunden handeln. Die bereits bedienten dynamischen Kunden waren zwischen 8:00 und 10:00 Uhr erschienen und sind bereits in die Tour aufgenommen worden. Der eine graugefärbte Kunde mit der Zeitangabe 8:30 Uhr symbolisiert einen solchen dynamischen Kunden, der fertig bedient ist. Schwarz gekennzeichnet sind die um 10:00 Uhr noch unbedienten statischen Kunden und weiß gekennzeichnet die noch unbedienten dynamischen Kunden. Dazu zählt u. a. der eine Kunde, der genau 10:00 Uhr bekannt wurde. Dieser löst die Erzeugung des Teilproblems,

³⁸³ Je nachdem ob ein DTSP oder DVRP zu lösen ist, erzeugt das Tour(en)planungsmodul eine oder mehrere Touren.

das in der rechten Grafik zu sehen ist, aus. Aufgrund des neuen dynamischen Kunden muss 10:00 Uhr bei Anwendung der SEO-Strategie die Planung zur Lösung dieses Teilproblems erfolgen. Aus der Planung resultiert eine Tour, die von der aktuellen Fahrzeugposition zum Depot führt und, neben allen noch unbedienten Kunden, vor allem den neuen dynamischen Kunden enthält. Die linke Grafik zeigt des Weiteren noch drei Standorte von dynamischen Kunden, die später als 10:00 Uhr bekannt werden. Diese Kunden sind als gepunktete Kreise dargestellt. Zusammenfassend kann herausgestellt werden, dass in diesem Beispiel insgesamt acht Planungen bei Anwendung der SEO-Strategie zur Lösung des dynamischen Gesamtproblems erfolgen. Die erste Planung findet für die statischen Kunden statt, bevor das Fahrzeug das Depot verlässt. Die weiteren sieben Planungen erfolgen immer dann, wenn einer der sieben dynamischen Kunden auftritt. Algorithmen, die das in der rechten Grafik veranschaulichte statische Teilproblem lösen, d. h. eine Tour ermitteln, bei der Startpunkt (aktuelle Fahrzeugposition) und Zielpunkt (Depot) verschieden sind, werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

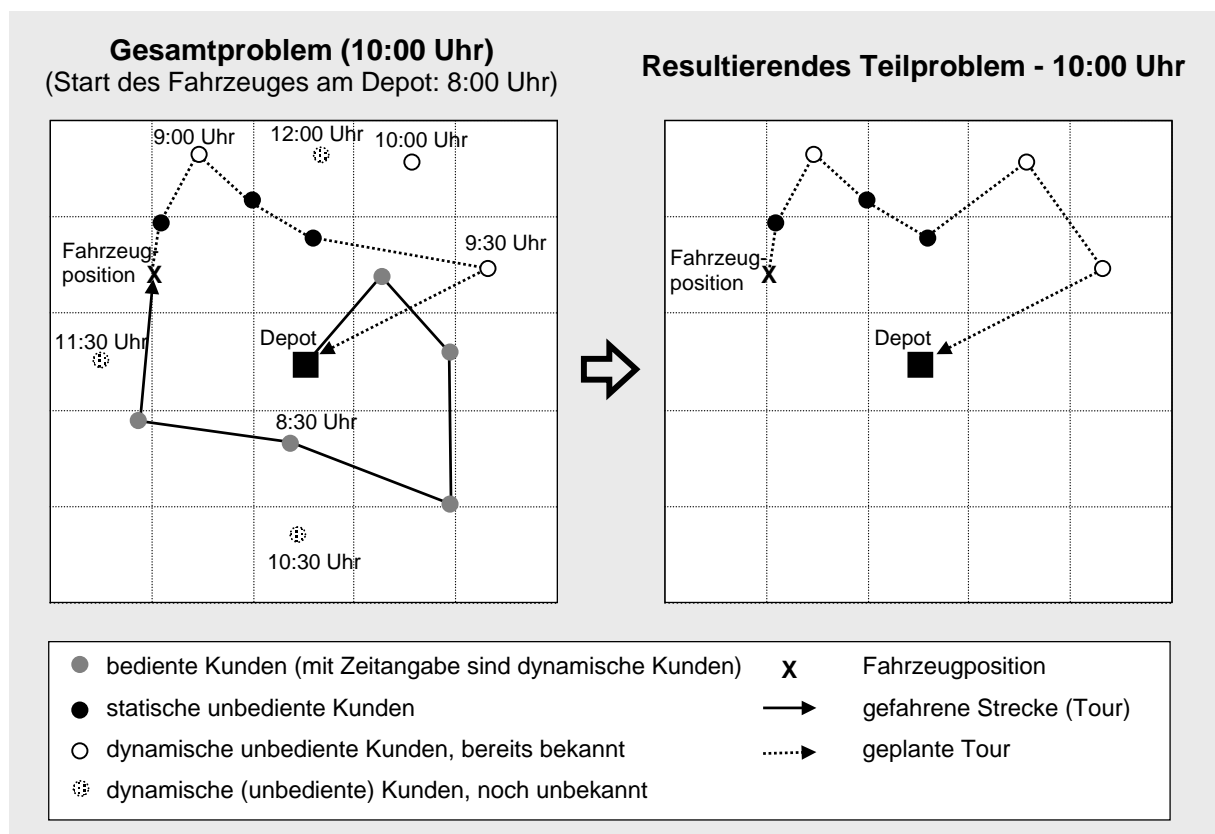


Abb. 4-2: Erzeugung eines statischen Teilproblems aus dem dynamischen Gesamtproblem bei der dynamischen Rundreiseplanung

Bei der dynamischen Tourenplanung ergeben sich aufgrund der Kundenbedarfe mehrere Touren und somit auch mehrere Fahrzeugpositionen. Eine Tour führt dabei i. d. R. von einer aktuellen Fahrzeugposition zum Depot. Die Restkapazitäten³⁸⁴ der bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge sind dementsprechend zu beachten. Aufgrund hinzugekommener dynamischer Kunden können auch zusätzliche Touren notwendig werden, die am Depot beginnen und enden. Dies ist dann der Fall, wenn die Restkapazitäten der bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge nicht mehr ausreichen, um gerade bekannt gewordene dynamische Kunden mitzubedienen. Die Abbildung 4-3 veranschaulicht, analog zur dynamischen Rundreiseplanung, wie bei der dynamischen Tourenplanung aus dem dynamischen Gesamtproblem bei Auftritt eines dynamischen Kunden ein statisches Teilproblem gebildet wird. Bei diesem Beispiel kommen gleich zwei neue Kunden um 10:00 Uhr hinzu.

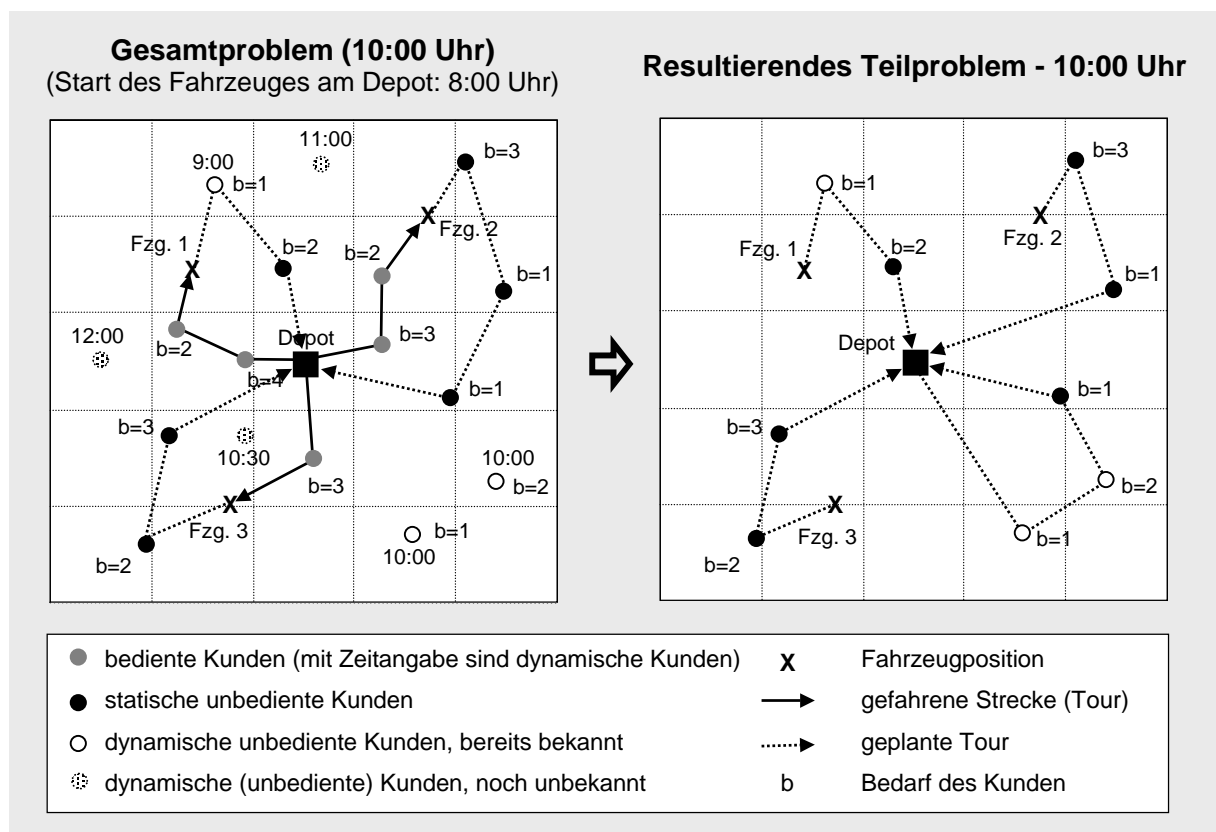


Abb. 4-3: Erzeugung eines statischen Teilproblems aus dem dynamischen Gesamtproblem bei der dynamischen Tourenplanung

³⁸⁴ Die Restkapazität stellt bei Sammeltouren den noch vorhandenen freien Laderaum des Fahrzeuges und bei Auslieferungstouren die noch zusätzlich verfügbare Menge an Gütern an Bord des Fahrzeuges dar. Im Rahmen der Arbeit wird nur der Begriff Restkapazität verwendet.

In der linken Grafik ist zu sehen, wie drei Sammeltouren ausgefahren werden und welche Strecken infolgedessen drei Fahrzeuge bis 10:00 Uhr zurückgelegt haben. Wie im vorherigen Beispiel für die dynamische Rundreiseplanung bereits ausführlich erläutert, sind im Rahmen des dynamischen Gesamtproblems schon Planungen erfolgt. Aus den zuvor durchgeführten Planungen resultiert, dass drei Fahrzeuge am Depot gestartet sind. Angenommen alle Fahrzeuge haben eine maximale Kapazität von 10 ME, dann weist Fahrzeug 1 eine Restkapazität von 4 ME, Fahrzeug 2 von 5 ME und Fahrzeug 3 von 7 ME auf. Die rechte Grafik in Abbildung 4-3 zeigt, wie beispielsweise eine Lösung des um 10:00 Uhr entstehenden statischen Teilproblems aussehen könnte. Die Anzahl, der zur Bedienung der Kunden notwendigen Touren hat sich erhöht. Drei Touren starten an den aktuellen Fahrzeugpositionen und eine Tour beginnt am Depot neu. Alle Touren enden am Depot. In den meisten Fällen wird die Anzahl der zu fahrenden Touren während der Lösung des dynamischen Gesamtproblems zunehmen, weil nach und nach weitere dynamische Kunden hinzukommen. Da jedoch im Rahmen dieser Arbeit die Annahme zugrundegelegt wird, dass keine Prognosedaten über die Anzahl der noch zu erwartenden dynamischen Kunden bzw. über die Höhe ihrer Bedarfe vorliegen, ist es nicht sinnvoll, gleich am Anfang mehrere Fahrzeuge mit einer geringen Auslastung am Depot loszuschicken. Insgesamt erfolgen bei diesem Beispiel nach der SEO-Strategie sechs Planungen. Algorithmen, die das in der rechten Grafik veranschaulichte statische Teilproblem lösen, d. h. Touren bestimmen, die an verschiedenen Startpunkten (aktuelle Fahrzeugpositionen) beginnen und an einem Zielpunkt (Depot) enden, sowie gegebenenfalls weitere Touren ermitteln, die am Depot starten und enden, werden im Kapitel 4.3 präsentiert.

Grundsätzlich kann bei Verfahren zur dynamischen Rundreise- oder Tourenplanung eine Unterscheidung zwischen lokalen und globalen Verfahren erfolgen.³⁸⁵ Als lokale Verfahren werden jene definiert, die ein Einfügen eines dynamischen Kunden in eine bestehende Rundreise oder Tour versuchen, ohne dabei die Struktur der Rundreise bzw. die anderen Touren aufzubrechen. Dabei erfolgt die Berücksichtigung bestehender Restriktionen wie Kundenzeitfenster und Kapazitäten. Bei lokalen Verfahren ist somit ein Teil der Rundreise bzw. ein Teil des Tourenplans fix. Unter globalen Verfahren hingegen sind solche zu verstehen, die bei Auftreten eines dynamischen Kunden die Rundreise bzw. die Touren von Grund auf neu konstruieren, natürlich unter Beachtung der Restriktionen. Bei einem globalen Verfahren besteht die Möglichkeit, sowohl die Reihenfolge der Kunden innerhalb einer Tour als auch die Zuordnung der Kunden zu Touren zu modifizieren. Beispielsweise könnten lokale Verfahren den Vorteil besitzen, die Fahrer nicht unnötig zu verwirren, da i. d. R. nur wenige

³⁸⁵ Vgl. Stumpf, P. (1998), S. 114, Larsen, A. (2001), S. 84 f. und Lund et al. (1996), S. 8 f.

Touren verändert werden. Als Nachteil könnte im Gegensatz zu einer kompletten Neuplanung der Touren nicht ausgeschöpftes Optimierungspotenzial stehen.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen gehören der Gruppe der globalen Verfahren an. Primäres Ziel für die Entwicklung von globalen Verfahren war, möglichst gute Ergebnisse im dynamischen Rundreise- bzw. Tourenplanungsprozess zu erreichen. Die Aussage von Lund et al. "A procedure based on local operations is suboptimal, because of the possibility that an appearance of a new request can render the decisions made before the appearance of the new request suboptimal. This fact concerns both the sequence of stops on a particular route and the assignment of vehicles to customers."³⁸⁶ bestätigt diese Überlegung. Da häufige Änderungen bei der Rundreise bzw. den Touren aufgrund neuester Telematikkomponenten den Fahrern unverzüglich und einfach mitgeteilt werden können,³⁸⁷ stellt eine wiederholte Neuplanung kein Problem dar. Der oben geschilderte Nachteil, die eventuell häufige Änderung des geplanten noch nicht ausgeführten Teilstücks einer Tour, kann relativiert werden, da Telematikkomponenten die Möglichkeit anbieten, dass der Fahrer immer nur den aktuellen Zielort mitgeteilt bekommt. Der Fahrer erfährt daher nicht, wie oft der noch nicht ausgeführte Teil einer Route umgeplant wird.

Ziel der Arbeit ist die Lösung des dynamischen Gesamtproblems der dynamischen Tourenplanung. Dies erfolgt, wie zuvor erklärt wurde, indem die statischen Teilprobleme, die sich immer dann ergeben wenn neue dynamische Kunden auftreten, gelöst werden. Im Rahmen der parallel zur Entstehung dieser Arbeit durchgeführten umfangreichen Tests, deren Ergebnisse in Kapitel 4.5.2 präsentiert werden, wurde untersucht, welche der in den folgenden Kapiteln präsentierten Verfahren im Durchschnitt über eine Vielzahl von Beispielen die besten Ergebnisse in Bezug auf das Gesamtproblem erzielen.

Dazu muss im Voraus die Frage geklärt werden, soll ein Vergleich der Verfahren anhand der Ergebnisse für ein einzelnes Teilproblem oder für ein Gesamtproblem erfolgen. Ausgangspunkt der Arbeit war immer das Ziel, ein oder mehrere Verfahren zu entwickeln, die das dynamische Gesamtproblem lösen, dem sich ein Disponent gegenüber sieht. Dabei wird es der Wunsch des Disponenten sein, ein Verfahren nutzen zu wollen, das gewährleistet, dass alle statischen Kunden bedient werden sowie dass die Aufnahme der dynamischen Kunden in den Tourenplan und deren Bedienung erfolgt. Darüber hinaus zieht der Disponent dasjenige Verfahren vor, bei dem im Durchschnitt das Fahrzeug (DTSP) bzw. die Fahrzeuge (DVRP) schnellstmöglich nach Lösung des dynamischen Gesamtproblems wieder am Depot

³⁸⁶ Lund et al. (1996), S. 9.

³⁸⁷ Vgl. Kapitel 3.6.

sind. Da aus praktischer Sicht immer die Lösung des dynamischen Gesamtproblems im Vordergrund steht, kann es nur Ziel der Arbeit bzw. der durchgeführten Test sein, **Vergleiche anhand der Ergebnisse für das Gesamtproblem** durchzuführen und nicht anhand von Ergebnissen für das Teilproblem.

Die Autoren LUND, LARSEN, ICHOUA et al. und LACKNER, die bis jetzt die bedeutendsten Arbeiten zu Lösungsverfahren für dynamische Tourenplanungsprobleme verfasst haben, führen ebenfalls nur Tests auf Basis des Gesamtproblems durch.³⁸⁸ Während des parallel zur Entstehung dieser Arbeit durchgeführten Literaturstudiums wurden keine Arbeiten bekannt, die Vergleiche auf Basis der Teilprobleme durchführen.

Grundsätzlich erscheint es nicht möglich ein Verfahren zu konstruieren, dass "direkt" das Gesamtproblem löst. Vielmehr führt die Lösung der statischen Teilprobleme innerhalb des rollierenden Planungskonzeptes zur Lösung des dynamischen Gesamtproblems. Dabei lässt sich nicht vermeiden, dass eine optimale Lösung (im Sinne der verwendeten Heuristiken) der statischen Teilprobleme nicht notwendigerweise eine optimale Lösung des Gesamtproblems impliziert.³⁸⁹ So wäre es durchaus denkbar, dass ein Verfahren, das alle Teilprobleme „am besten“ löst, in Hinblick auf die Lösung des Gesamtproblems einem Verfahren, dass die Teilprobleme schlechter löst, unterlegen ist.

Wie bereits in Kapitel 3.1 herausgestellt, können einmal getroffene Entscheidungen im Laufe des gesamten Dispositionsprozesses suboptimal werden, da zufällige Ereignisse (z. B. Auftritt eines neuen dynamischen Kunden) das Planungsproblem beeinflussen. Dieser Problematik müssen sich die neu entwickelten Verfahren stellen. Wie gut ein Verfahren bei einem einzelnen Teilproblem abschneidet, hat für den Disponenten nur eine untergeordnete Bedeutung. Er ist vielmehr an der Lösung des Gesamtproblems interessiert. Daher werden in dieser Arbeit die Verfahren anhand der Ergebnisse für das Gesamtproblem verglichen.

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Heuristiken zur Lösung des dynamischen Traveling Salesman Problems und des dynamischen Tourenplanungsproblems enthalten, wie beschrieben, die Möglichkeit den aktuellen Fahrzeugzug zu ändern. Dabei gilt es zu beachten, dass die Änderung des aktuellen Zuges **nicht verpflichtend** ist. Die Änderung des aktuellen Zuges wird nur durchgeführt, wenn es aus Sicht der Heuristik erfolgversprechend erscheint. Im Rahmen der Testläufe (vgl. Kapitel 4.5.2) erfolgt dann ein Vergleich zwischen

³⁸⁸ Vgl. Lund, K. et al. (1996), S. 10 ff., Larsen, A. (2001), S. 88 ff., Ichoua, S. et al. (2000), S. 433 ff. und Lackner, A. (2003), S. 92 ff.

³⁸⁹ Diesen Nachteil könnte auch die Verwendung eines exakten Verfahrens zur Lösung der Teilprobleme nicht beheben.

den zwei Varianten *Änderung aktueller Zug möglich* und *Änderung aktueller Zug nicht möglich*.

4.2 Modell und Verfahren zum Dynamic Traveling Salesman Problem (DTSP)

In diesem Kapitel wird zunächst das dynamische Traveling Salesman Problem (DTSP), ein Spezialfall des dynamischen Vehicle Routing Problems (DVRP), analysiert. Auf der einen Seite stellt es einen einfacheren Einstieg in die Thematik als das dynamische Vehicle Routing Problem dar, da keine Kundenbedarfe und Fahrzeugkapazitäten beachtet werden müssen. Auf der anderen Seite ist die Beschäftigung mit dynamischen Traveling Salesman Problemen von Interesse, da sie Teilprobleme bei der Lösung eines dynamischen Vehicle Routing Problems sein können. Dieses Kapitel gliedert sich wie folgt: Zuerst findet die Beschreibung des zugrundeliegenden mathematischen Modells statt (Kapitel 4.2.1), bevor im Anschluss heuristische Verfahren zur Lösung des DTSPs vorgestellt werden (Kapitel 4.2.2 - 4.2.5). Abschließend erfolgt die Erläuterung, dass sowohl eine Heuristik, die die Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges enthält, als auch eine Heuristik, bei der dies verboten ist, bei einem Testbeispiel das beste Ergebnis erzielen kann, da es sich jeweils um ein heuristisches Lösungsverfahren handelt (Kapitel 4.2.6).

4.2.1 Ablauf und Modell des Dynamic Traveling Salesman Problems

Basierend auf dem zuvor allgemein geschilderten rollierenden Planungskonzept (vgl. Abb. 4-1) ergibt sich folgender **Ablauf der dynamischen Rundreiseplanung**:

Zum Start der rollierenden Planung (erste Planung) besteht die Knotenmenge V nur aus den statischen Kunden i , mit $i = 1, \dots, n$, und dem Depot (Knoten 0). Das Depot ist sowohl Startknoten als auch Zielknoten für die Bestimmung der Rundreise (Tour) von den statischen Kunden. Das Problem wird gelöst - als Ergebnis liegt eine Rundreise (Tour), die im Depot beginnt und endet, vor. Kommen weitere Kunden (Knoten) hinzu, findet der nächste Planungslauf der rollierenden Planung statt. Die Ausführung der aktuell gültigen Rundreise (Tour) wird unterbrochen.³⁹⁰ Die Knotenmenge V vergrößert sich um den oder die neuen Kunden und vermindert sich um die bis zum aktuellen Zeitpunkt fertig bedienten Kunden.³⁹¹

³⁹⁰ Die Unterbrechung der Rundreise erfolgt natürlich nur im Planungssystem mit dem Zweck eine Neuplanung für das Teilproblem durchzuführen. Das Fahrzeug setzt seine Fahrt fort, erhält aber innerhalb weniger Sekunden das neue Planungsergebnis, da die Planung durch den Einsatz von Heuristiken nur wenige Sekunden benötigt.

³⁹¹ Eine eventuelle Umnummerierung der Knoten durch das Hinzukommen und Herausnehmen von Kunden aus der Datenbasis kann bei der Formulierung und Lösung eines jeden Teilproblems notwendig werden.

Des Weiteren muss beachtet werden, dass noch der Startknoten s zu berücksichtigen ist, der in die Knotenmenge V aufgenommen wird. Hierbei kann es sich um einen Knoten i (Kunden) handeln, bei dem das Fahrzeug gerade steht, oder es muss ein zusätzlicher Knoten generiert werden, wenn das Fahrzeug sich auf der Kante zwischen zwei Knoten i und j befindet. Ausgehend von der aktuellen Fahrzeugposition s (Startpunkt) ist eine Tour³⁹² zu konstruieren, die am Depot endet (Zielpunkt). Das Teilproblem wird unter Berücksichtigung der neuen Datenbasis gelöst. Als Ergebnis liegt eine am Startknoten s beginnende und am Depot endende Tour vor, welche die jetzt aktuell gültige Tour bis zum nächsten Auftritt eines neuen dynamischen Kunden darstellt. Erscheinen weitere dynamische Kunden, wird jedes Mal ein weiterer Planungslauf durchgeführt. Erreicht das Fahrzeug hingegen das Depot, ist das dynamische Traveling Salesman Problem (Rundreiseproblem) gelöst.

Das **mathematische Modell**, das zur Beschreibung der statischen Teilprobleme dient, hat folgende Gestalt:

Gegeben sei ein zusammenhängender bewerteter Graph $G=(V,E,c)$ mit der Knotenmenge V , der Kantenmenge E und den Kantenbewertungen c_{ij} . Der Graph G ist für jedes Teilproblem neu zu bestimmen, da V und E durch das Hinzukommen von dynamischen Kunden und der Erledigung von Kundenaufträgen sowie der Veränderung der aktuellen Fahrzeugposition variieren. Die Bestimmung der Distanzen c_{ij} zwischen allen Knoten $i, j \in V$ mit $i < j$ erfolgt unter Verwendung der euklidischen Distanz $c_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$.³⁹³ Infolgedessen ergibt sich ein vollständiger Graph und alle Werte c_{ij} der Bewertungsmatrix C sind bestimmt.

Variablen und Parameter:

- V Knotenmenge mit $i = 2, \dots, n$ Kunden und Startknoten s (aktuelle Fahrzeugposition, $i = 1$) sowie Depot mit $i = 0 \Rightarrow V = \{0, s(1), 2, \dots, n\}$
- s Startknoten, gibt die aktuelle Fahrzeugposition an
- E Kantenmenge, $E = \{[i, j] : i, j \in V, i < j\}$
- x_{ij} Binärvariable, mit $i, j = 0, \dots, n$ und $i < j$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls Kante } [i, j] \text{ benutzt wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad x_{ij} = 0 \text{ für } i = j$$
- c_{ij} Bewertung der Kante zwischen Knoten i und Knoten j

³⁹² Statt des Begriffes Rundreise wird hier der Begriff Tour verwendet, da Start- und Zielpunkt verschieden sind. Der Begriff Tour wird im Rahmen dieser Arbeit folgendermaßen definiert: Eine Tour ist die Strecke, die von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt zurückgelegt wird. Sie enthält alle Kunden, die durch ein Fahrzeug auf dieser Strecke bedient werden können. Startknoten und Zielknoten können bei dieser Definition voneinander abweichen.

³⁹³ Vgl. Kapitel 2.7. (x_i, y_i) und (x_j, y_j) sind die Koordinaten der Kundenstandorte i und j .

A Teilmenge von V , die zur Überprüfung auf Kurzzyklen benutzt wird

*Formale Beschreibung des Modells*³⁹⁴

$$\text{ZF: } \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (4.1)$$

$$\text{NB: } \sum_{h=0}^{i-1} x_{hi} + \sum_{j=i+1}^n x_{ij} = 2 \quad \text{für alle } i \in (V \setminus \{0\} \setminus \{s\}) \quad (4.2)$$

$$\sum_{h=0}^{i-1} x_{hi} + \sum_{j=i+1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{für } i = s \text{ und } i = 0 \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{\substack{j \in V \setminus A \\ i < j}} x_{ij} + \sum_{i \in V \setminus A} \sum_{\substack{j \in A \\ i < j}} x_{ij} \geq 2 \quad \text{für alle } A \subset (V \setminus \{0\} \setminus \{s\}) \text{ mit } 2 \leq |A| \leq \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{\substack{j \in V \setminus B \\ i < j}} x_{ij} + \sum_{i \in V \setminus B} \sum_{\substack{j \in B \\ i < j}} x_{ij} = 2 \quad B = \{s, 0\} \quad (4.5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.6)$$

Erklärung des Modells

Die Zielfunktion (Ausdruck (4.1)) minimiert die gesamte Fahrstrecke bzw. die gesamte Fahrzeit, je nach dem was die Bewertung c_{ij} angibt. Die Nebenbedingungen (Ausdrücke (4.2) - (4.5)) gewährleisten, dass jeder Kunde genau einmal erreicht wird, dass die Tour am Startpunkt beginnt und am Depot endet sowie dass Kurzzyklen vermieden werden. Die Abbildung 4-4 stellt für die Nebenbedingungen 4.2 bis 4.5 je eine gültige und eine ungültige Lösung dar. Nebenbedingung (4.2) gewährleistet, dass jeder Knoten $i \in (V \setminus \{0\} \setminus \{s\})$ (d. h. mit Ausnahme des Depots (Knoten 0) und des Startknotens s) genau über zwei Verbindungen mit den restlichen Knoten der Menge V verbunden ist. Das bedeutet, jeder Knoten wird erreicht und auch wieder verlassen, also genau einmal besucht. Nebenbedingung (4.3) beschreibt den Sachverhalt, dass der Startknoten s nur verlassen und das Depot nur erreicht werden kann, indem nur eine Verbindung zu den restlichen Knoten der Menge V besteht. Die Vermeidung von Kurzzyklen, die das Depot nicht enthalten, garantiert Nebenbedingung (4.4). Damit ausgehend vom Startknoten irgendwann das Depot erreicht wird und keine Direktverbindung zwischen dem Startknoten und dem Depot entsteht, ist Nebenbedingung

³⁹⁴ Im Anhang A3 ist das Modell ausführlich für ein Beispiel aufgeschrieben. (Beispiel zur modifizierten Sukzessiven Einbeziehung, vgl. Abbildung 4-9: Grafik 2 (9:00 Uhr)).

³⁹⁵ $\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil = \min_{z \in \mathbb{N}} z, z \geq \frac{n}{2}$

(4.5) notwendig. Zur Verwendung des Modells müssen die Anzahl der Knoten (= Anzahl unbediente Kunden + Depot + Startknoten) und die Bewertungen c_{ij} der Kanten gegeben sein.

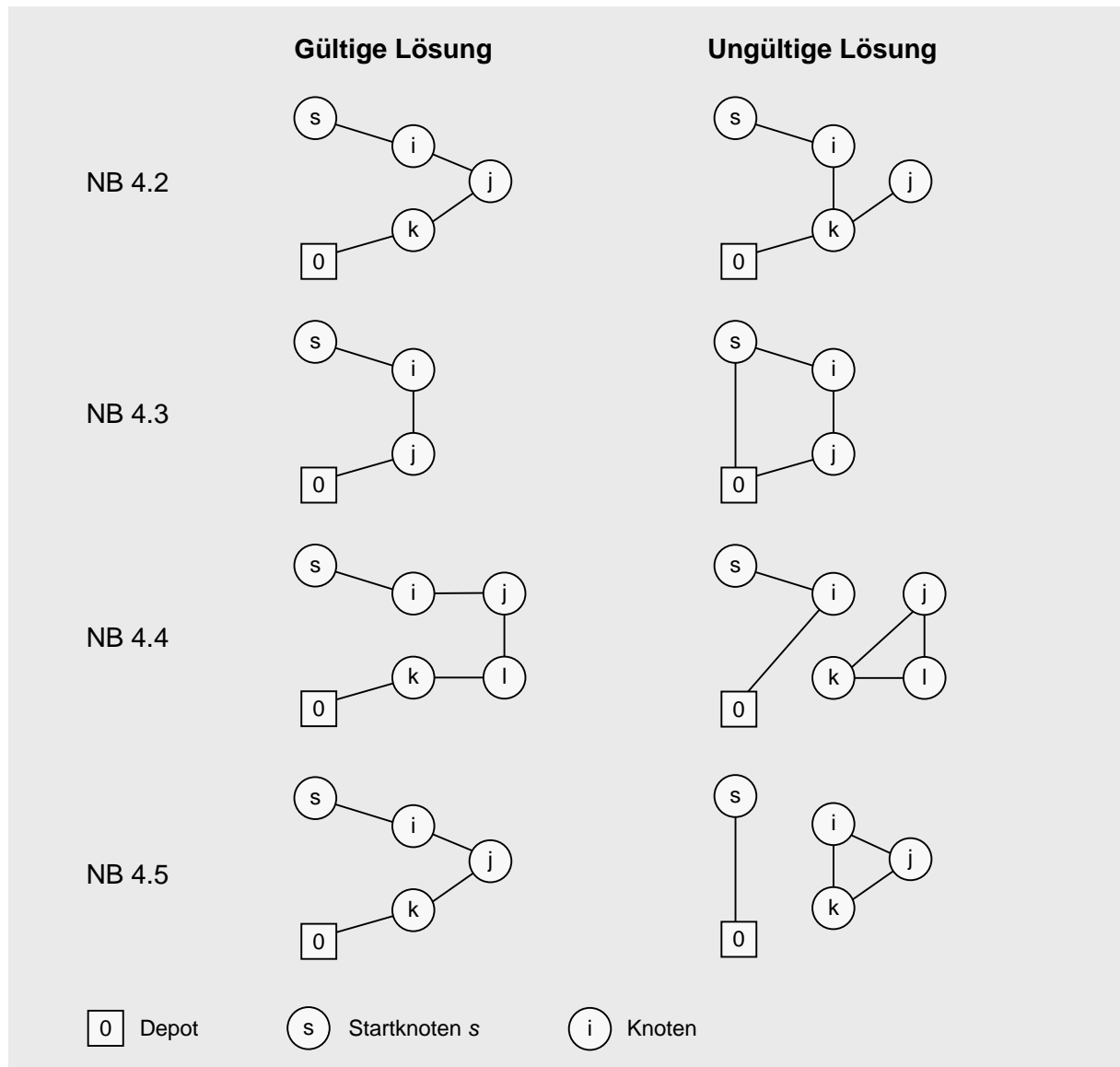


Abb. 4-4: Wirkung der Nebenbedingungen des Modells zur Beschreibung der statischen Teilprobleme bei der dynamischen Rundreiseplanung

Zur Lösung des Modells werden in den nächsten Unterkapiteln vier heuristische Algorithmen vorgestellt. Hierbei handelt es sich um Modifikationen der bekannten klassischen Heuristiken Bester Nachfolger, Sukzessive Einbeziehung, Verfahren von Christofides und Savings-Verfahren, deren Anpassung für das dynamische Rundreiseproblem stattfand. Es erfolgte die Auswahl dieser Algorithmen, da sie zu den bekanntesten Verfahren gehören, welche auch in der Literatur am meisten diskutiert werden.³⁹⁶

³⁹⁶ Vgl. Domschke, W. (1997), S. 110 ff., Jungnickel, D. (1994), S. 533, Uhr, W./ Lasch, R. (2003), S. B3.5.1.2.2., Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 445 ff., Reinelt, G. (1994), S. 73 ff., Vahrenkamp, R. (2003), S. 204 ff. sowie Zimmermann, W. (1999), S. 151 f.

4.2.2 Modifiziertes Verfahren Bester Nachfolger

Im Folgenden wird der Ablauf des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger beschrieben:

- Start: Bestimme Startknoten $v_s \in V$ ($s = 1$); bestimme noch nicht bediente Knoten $v_i \in V$, mit $i = 2, \dots, n$; $v_0 \in V$ ist das Depot
 $\Rightarrow V = \{v_0, v_{1(s)}, v_2, \dots, v_n\}$, Länge $L=0$.
- Iteration i ($=2, 3, \dots, n$): Suche den (bei Gleichheit einen beliebigen) Knoten $v_i \in V$ mit

$$c_{v_{i-1}, v_i} = \min \{c_{v_{i-1}, j} \mid j \neq v_0, \dots, v_{i-1}\},$$

$$L := L + c_{v_{i-1}, v_i}.$$
- Ergebnis: Es liegt die Kette $[v_{1(s)}, v_2, \dots, v_n, v_0]$ vom Startknoten v_s , mit $s = 1$, zum Zielknoten v_0 mit Länge $L := L + c_{v_n, v_0}$ vor.

Bei der Anwendung des oben dargestellten modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger kann eine Unterscheidung dahingehend erfolgen, ob eine Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt ist oder nicht.³⁹⁷ Ist die Änderung des aktuellen Zuges möglich, wird sofort eine Neuplanung bei Auftreten eines neuen dynamischen Kunden durchgeführt. D. h. im Gegensatz zum ursprünglichen Algorithmus des Besten Nachfolgers findet infolge der Neuplanung ein Abbruch der Ausführung der Tour an der aktuellen Fahrzeugposition statt. Für die neuerliche Anwendung des oben dargestellten modifizierten Bester Nachfolger Verfahrens ist die aktuelle Datenbasis zu bilden, die sich aus allen unbedienten Kunden der gerade abgebrochenen Tour und dem neuen dynamischen Kunden und dem Startknoten zusammensetzt. Ausgehend von der aktuellen Fahrzeugposition (Startknoten s) werden alle Kunden der Datenbasis nach dem Prinzip des bestens Nachfolgers in die Tour aufgenommen. Komplettiert wird die neue Tour durch den Weg vom letzten ausgewählten Kunden zum Depot.

Ist die Änderung des aktuellen Zuges verboten, stellt der momentan anvisierte Kunde (Knoten) den Startknoten dar. Auch hier erfolgt die Generierung einer Tour vom Startknoten zum Depot. Lediglich das Teilstück von der aktuellen Fahrzeugposition zum momentan angesteuerten Kunden ist fix. Infolgedessen sind die aktuelle Fahrzeugposition und der Startknoten verschieden. Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten bezüglich des Planungszeitpunktes. Zum einen kann die Planung sofort bei Auftritt des dynamischen Kunden erfolgen. Die neue Tour setzt sich aus dem unveränderlichen Teilstück und dem neugeplanten Teilstück vom anvisierten Kunden (Startknoten) zum Depot zusammen. Zum anderen besteht die Möglichkeit alle dynamischen Kunden, die in dem Zeitraum auftreten bis das Fahrzeug den

³⁹⁷ Vgl. Kapitel 3.4.2.

anvisierten Kunden wieder verlassen will, in Form einer Batching-Strategie zu sammeln und erst dann die Tour von diesem Kunden (Startknoten) zum Depot zu planen. Dadurch kann die Anzahl der Planungen verringert werden, wenn während der Zeitspanne, die das Fahrzeug benötigt, um von der aktuellen Fahrzeugposition zum momentan angesteuerten Kunden zu gelangen, mehrere dynamische Kunden bekannt werden.

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels der Ablauf des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger demonstriert. Dabei erfolgt auch ein Vergleich der Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt* mit der Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges verboten*. Abbildung 4-5 stellt die Ausgangssituation dar. Abbildung 4-6 und Tabelle 4-2 zeigen das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die erste Variante. Tabelle 4-3 und Abbildung 4-7 präsentieren das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die zweite Variante.

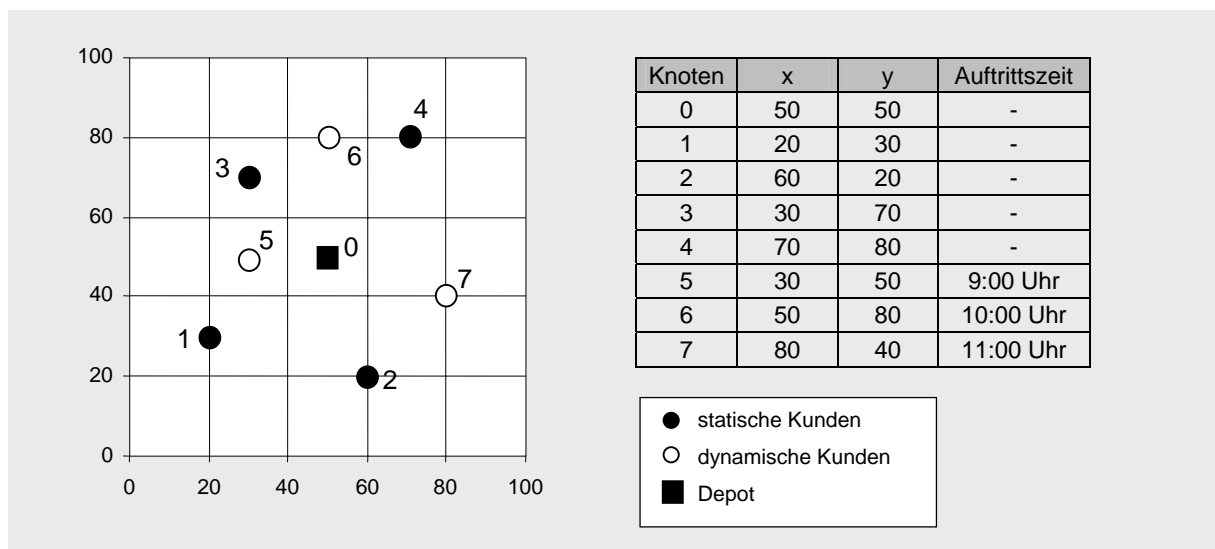


Abb. 4-5: Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger

In den Abbildungen 4-5 bis 4-7 ist zu sehen, dass das Kundengebiet eine Ausdehnung von 100 LE x 100 LE hat, wobei eine LE einem Kilometer entspricht. Zur Bestimmung der Entfernung wird die Koordinatenmethode³⁹⁸ verwendet. Die Kunden 1 bis 4 sind statisch und die Kunden 5 bis 7 dynamisch. Kunde 5 tritt 9:00 Uhr auf, Kunde 6 um 10:00 Uhr und Kunde 7 um 11:00 Uhr. Das Fahrzeug startet 8:00 Uhr am Depot und fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h.

³⁹⁸ Die Entfernung zwischen zwei Punkten i und j wird nach der Formel $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ (Euklidische Distanz) bestimmt, wobei (x_i, y_i) bzw. (x_j, y_j) die Koordinaten der Punkte i und j sind.

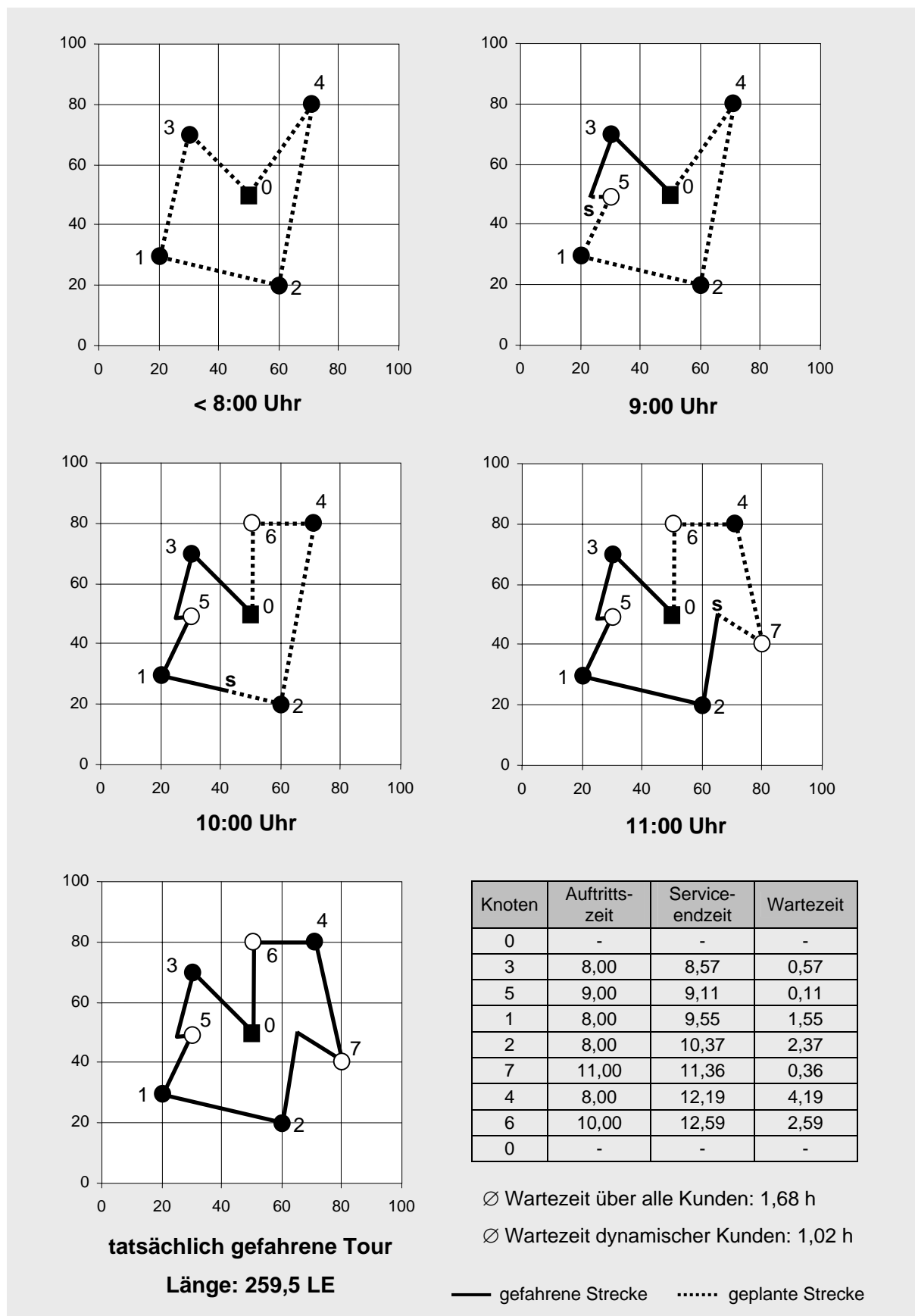


Abb. 4-6: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Besten Nachfolger mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-3-1-2-4-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 3)
8,57	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 1)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (24,73;48,93) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-5-1-2-4-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
9,11	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 1)
9,55	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
10,00	Kunde 6 tritt auf; Startknoten (41,59;24,60); als neue Rundreise ergibt sich: s-2-4-6-0 keine Änderung des aktuellen Ziels
10,37	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
11,00	Kunde 7 tritt auf; Startknoten (65,10;50,60); als neue Rundreise ergibt sich: s-7-4-6-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
11,36	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
12,19	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
12,59	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Depot)
13,19	Depot erreicht

Tab. 4-2: Ablauf des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger bei Änderung aktueller Zug erlaubt

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-3-1-2-4-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 3)
8,57	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 1)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (24,73;48,93); Startknoten für die Planung ist allerdings Knoten 1 ($s=1$), da der aktuelle Zug nicht verändert werden darf; als neue Rundreise ergibt sich: $s(1)$ -5-2-4-0
9,39	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
9,84	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
10,00	Kunde 6 tritt auf; $s=2$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(2)$ -4-6-0
10,68	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
11,00	Kunde 7 tritt auf; $s=4$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(4)$ -6-7-0
11,90	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
12,30	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
13,30	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Depot)
13,93	Depot erreicht

Tab. 4-3: Ablauf des modifizierten Verfahrens Bester Nachfolger bei Änderung aktueller Zug verboten

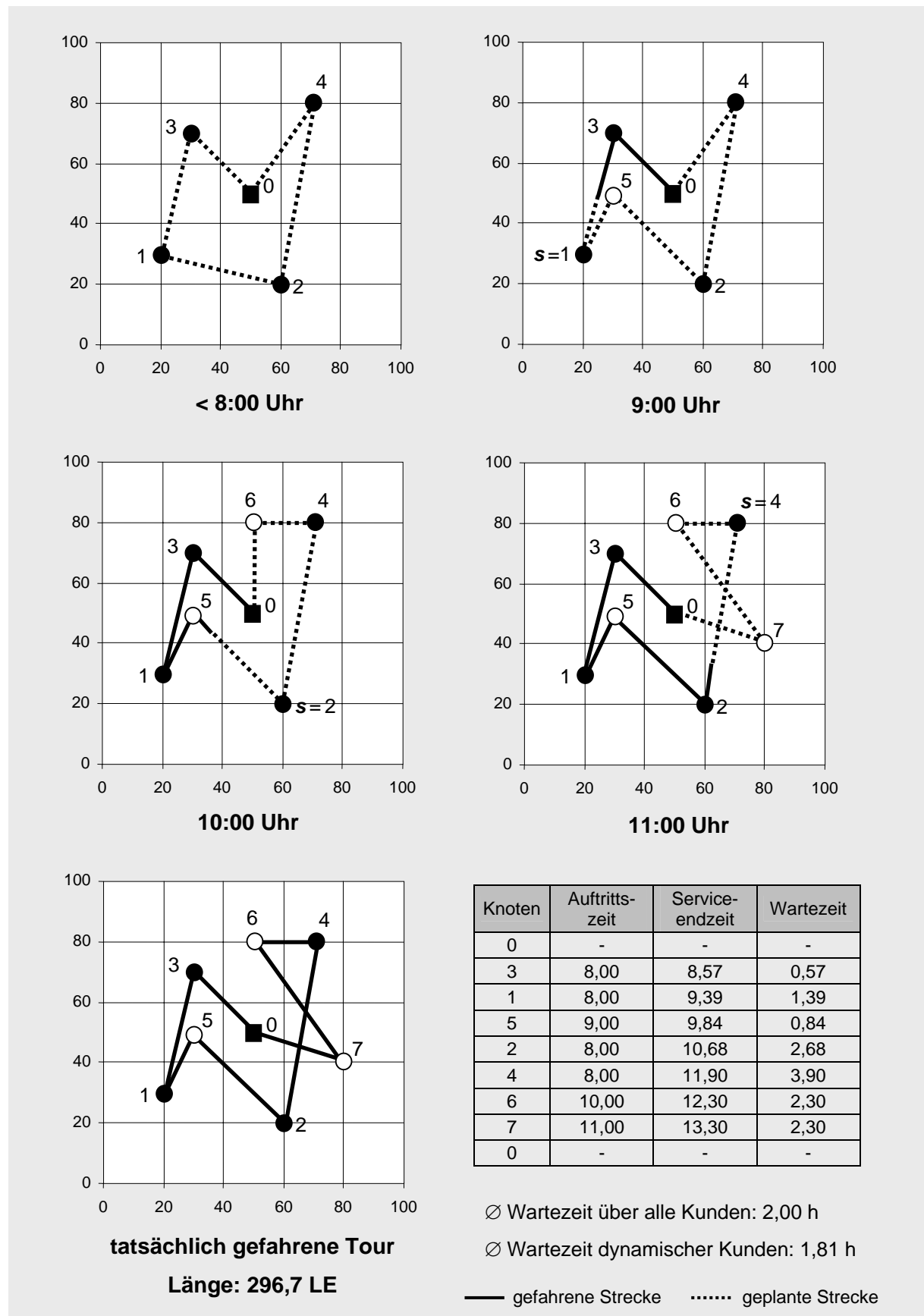


Abb. 4-7: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Besten Nachfolger ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Ferner ist den Abbildungen 4-6 und 4-7 zu entnehmen, dass drei Kennzahlen bestimmt wurden, anhand derer die Beurteilung der erhaltenen Lösungen erfolgt. Die Kennzahlen sind die Länge der tatsächlich gefahrenen Strecke, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden. Die Tour- bzw. Rundreiselänge ist das primäre Zielkriterium in der Literatur zur klassischen Tourenplanung bei der Lösung von Traveling Salesman Problemen, so dass es auch hier beim dynamischen Traveling Salesman Problem verfolgt wird, und infolgedessen die Bestimmung der Tourlänge als Kennzahl stattfindet. Bei den in Kapitel 3.1 formulierten Thesen, die die Unterschiede zwischen dynamischer und statischer Tourenplanung aufzeigen, wird beschrieben, dass die Wartezeit der Kunden auf die Erfüllung ihres Bedürfnisses oder Bedarfs bei der dynamischen Tourenplanung ein weiteres wichtiges Zielkriterium ist. Daher erfolgte die Berechnung der durchschnittlichen Wartezeit über alle Kunden und der durchschnittlichen Wartezeit der dynamischen Kunden. Zur Ermittlung der durchschnittlichen Wartezeit über alle Kunden wurde für die statischen Kunden als Auftragseingangszeitpunkt 8:00 Uhr festgelegt, was gleichzeitig dem Startzeitpunkt des Fahrzeuges am Depot entspricht.

Folgende Berechnungsformeln ergeben sich für die Wartezeit³⁹⁹, wenn eine Tour T , mit $T = [0, 1, 2, \dots, n, 0]$, vorliegt:

- totale Wartezeit über alle Kunden:
$$W_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} (t_{j,j+1} + SZ_{j+1}) \quad (4.7)$$

- durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden:
$$W_{T,\emptyset,\text{total}} = \frac{1}{n} W_T \quad (4.8)$$

- durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden:

$$W_{T,\emptyset,\text{dynam}} = \frac{1}{n_d} \sum_{i \in A} \sum_{j=0}^{i-1} (t_{j,j+1} + SZ_{j+1})$$

(mit A = Menge der dynamischen Kunden, t_{ij} = Fahrzeit von Knoten (Kunde) i zu j ,

SZ_i = Standzeit bei Kunde i , n_d = Anzahl dynamische Kunden) (4.9)

Als Ergebnis des für das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger herangezogenen Beispiels ergibt sich, dass bei allen Kennzahlen die Variante *Änderung des aktuellen Zuges erlaubt* besser abschneidet als die Variante *Änderung des aktuellen Zuges verboten*. Die Tourlänge ist bei der zweiten Variante um 14 %, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden um 19 % und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden um 77 % größer.

³⁹⁹ Die Wartezeit wird hier als die Zeitspanne zwischen Auftragseingang und Abfahrt des Fahrzeuges beim Kunden (Serviceendzeitpunkt) definiert.

4.2.3 Modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung

Folgenden Ablauf weist das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung auf:

- Start: Bestimme Startknoten $v_s \in V$ ($s = 1$); bestimme noch nicht bediente Knoten $v_i \in V$, mit $i = 2, \dots, n$; $v_0 \in V$ ist das Depot
 $\Rightarrow V = \{v_0, v_{1(s)}, v_2, \dots, v_n\}$; bilde Kurzkette $K = [v_{1(s)}, v_0]$ mit $L := c_{s0}$.
- Iteration i ($= 2, 3, \dots, n$): Bestimme Knoten $k \notin K$ und $v_k \in K$ so, dass
- $$c_{v_k k} = \max_{l \notin K} \min_{v_h \in K} c_{v_h l}$$
- sowie eine Kante $[v_m, v_{m+1}]$ auf K mit
- $$\delta := c_{v_m k} + c_{k v_{m+1}} - c_{v_m v_{m+1}} = \min \{c_{v_h k} + c_{k v_{h+1}} - c_{v_h v_{h+1}} \mid h = 0, \dots, i-1\}$$
- und füge den Knoten k zwischen v_m und v_{m+1} ein; $L := L + \delta$;
- Ergebnis: Es liegt die Kette $[v_{1(s)}, v_2, \dots, v_n, v_0]$ vom Startknoten v_s , mit $s = 1$, zum Zielknoten v_0 mit Länge L vor.

Die modifizierte Variante der sukzessiven Einbeziehung unterscheidet sich vom Original in der Bildung der Initialisierungskurztour. Beim Original wird ausgehend vom Startknoten (Depot) der am weitesten entfernte Knoten bestimmt. Die Initialisierungskurztour verläuft dann vom Startknoten zu dem am weitesten entfernten Knoten und zum Startknoten wieder zurück. Bei dem oben dargestellten neuen Algorithmus für dynamische Problemstellungen handelt es sich bei der Initialisierungskurzkette um den kürzesten Weg vom Startknoten, d. h. die aktuelle Fahrzeugposition, zum Depot.⁴⁰⁰ Nach der Bildung der Initialisierungskurzkette werden alle Kunden sukzessive nach bekanntem Vorgehen in die Kette aufgenommen. Zuvor muss natürlich genauso wie beim Besten Nachfolger die Bestimmung der Datenbasis einschließlich des Startknotens erfolgen. Auch hier kann wieder unterschieden werden, ob eine Änderung des aktuellen Zuges erlaubt ist oder nicht. Darf die Änderung des aktuellen Zuges erfolgen, stellt die aktuelle Fahrzeugposition den Startknoten dar. Wird die Änderung des aktuellen Zuges verboten, ist der momentan angesteuerte Kunde (Knoten) der Startknoten, d. h. erst ab diesem Knoten kann sich die Tour ändern. Die Datenbasis setzt sich bei beiden Alternativen aus allen zum aktuellen Zeitpunkt unbedienten Kunden und dem neuen dynamischen Kunden und dem Startknoten zusammen.

⁴⁰⁰ Bei der modifizierten Variante der Sukzessiven Einbeziehung bilden deshalb der Startknoten und das Depot die Initialisierungskurzkette, damit wie beim ursprünglichen Verfahren von Anfang an eine gültige Tour bzw. Rundreise existiert.

Im Folgenden wird auch für das modifizierte Verfahren der sukzessiven Einbeziehung der Ablauf anhand eines Beispiels gezeigt. Dabei erfolgt abermals ein Vergleich der Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt* mit der Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges verboten*. Abbildung 4-8 stellt die Ausgangssituation dar. Tabelle 4-4 und Abbildung 4-9 zeigen das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die erste Variante. Tabelle 4-5 und Abbildung 4-10 präsentieren das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die zweite Variante. Das Beispiel ist fast identisch zum vorherigen, lediglich einige Koordinaten der Kundenstandorte wurden etwas geändert, damit der Ablauf des Verfahrens besser gezeigt werden kann. Das Fahrzeug startet wieder 8:00 Uhr am Depot und fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h.

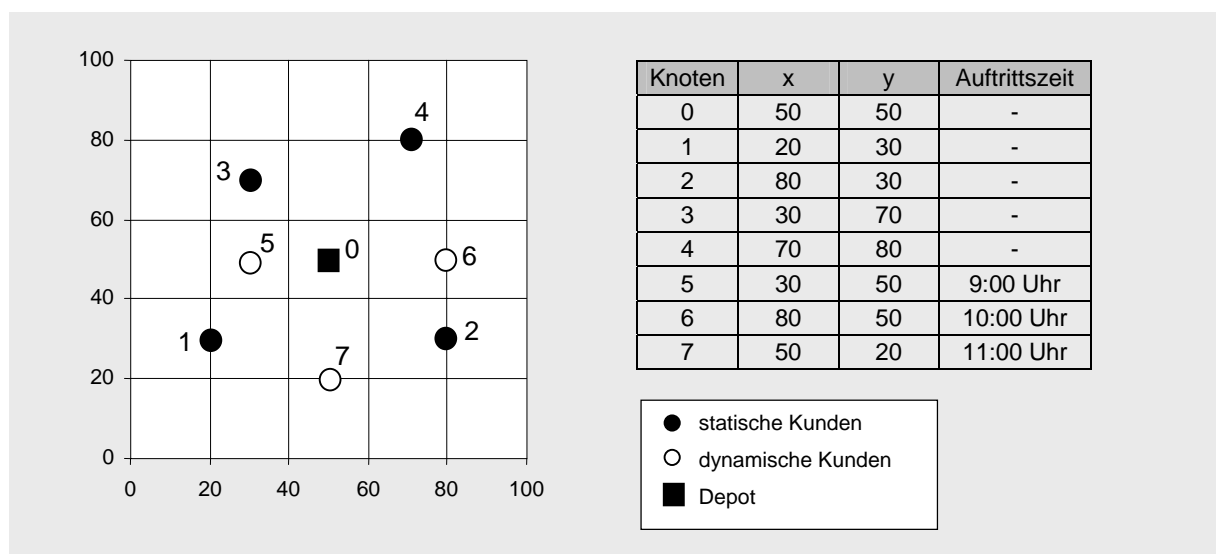


Abb. 4-8: Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-3-4-2-1-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 3)
8,57	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
9,00	<p>Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (51,07;75,27) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-4-2-1-5-0 → Iterationen der Sukzessiven Einbeziehung:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. s-0 2. s-1-0 3. s-2-1-0 4. s-4-2-1-0 5. s-4-2-1-5-0 <p>keine Änderung des aktuellen Ziels</p>

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
9,39	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
10,00	Kunde 6 tritt auf; Startknoten (75,98;50,11); als neue Rundreise ergibt sich: s-6-2-1-5-0 → Iterationen der Sukzessiven Einbeziehung: 1. s-0 (Initialisierungskurztour) 2. s-1-0 3. s-2-1-0 4. s-2-1-5-0 5. s-6-2-1-5-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
10,08	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
10,48	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 1)
11,00	Kunde 7 tritt auf; Startknoten (54,03;30,00); als neue Rundreise ergibt sich: s-7-1-5-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
11,21	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 1)
11,84	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
12,29	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Depot)
12,69	Depot erreicht

Tab. 4-4: Ablauf des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung bei Änderung aktueller Zug erlaubt

In der Tabelle 4-4 ist zum Zeitpunkt 9:00 Uhr detailliert aufgeführt, wie die Tourbildung nach der Sukzessiven Einbeziehung vom Startknoten s (51,07;75,27) zum Depot erfolgt, wenn die aktuelle Datenbasis (Menge der unbedienten Kunden) die Kunden (Knoten) 1, 2, 4 und 5 umfasst. Hierbei behält das Fahrzeug den anvisierten Kunden (Knoten) 4 bei, da der neue dynamische Kunde (Knoten 5) am Ende der Tour steht. Die Planung zum Zeitpunkt 10:00 Uhr, als wiederum ein neuer Kunde (Knoten 6) hinzukommt, zeigt ein Planungsbeispiel, bei dem der anvisierte Knoten geändert wird. Das Fahrzeug steuert nicht mehr Knoten 2 an, sondern soll zuerst zu Knoten 6 fahren. Diese Entscheidung ist aus praktischer Sicht leicht nachzuvollziehen, wenn die räumliche Nähe zwischen dem aktuellen Startknoten (75,98;50,11) und Kunde (Knoten) 6 beachtet wird.

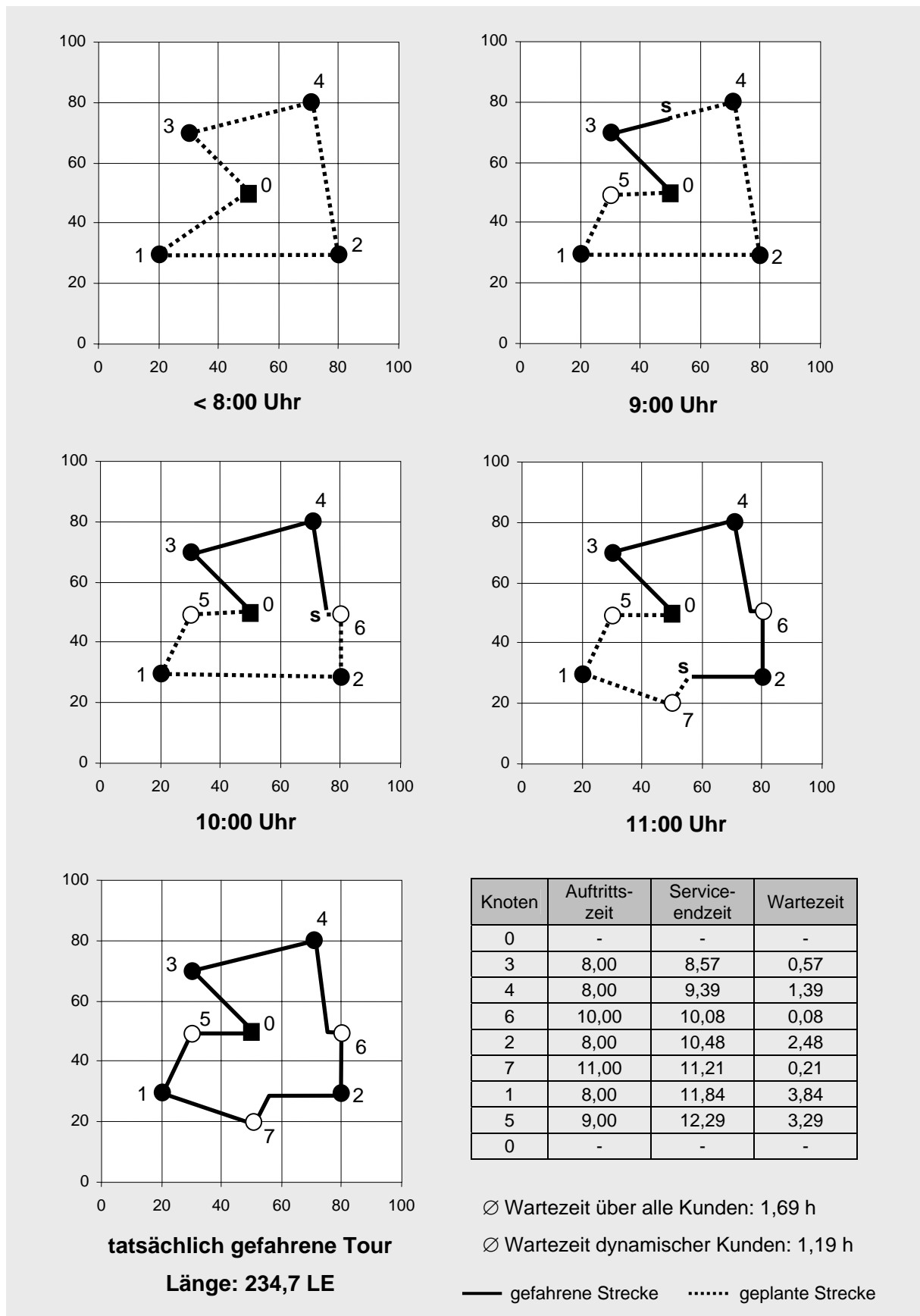


Abb. 4-9: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-3-4-2-1-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 3)
8,57	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (51,07;75,27); Startknoten für die Planung ist allerdings Knoten 4 ($s=4$), da der aktuelle Zug nicht verändert werden darf; als neue Rundreise ergibt sich: $s(4)$ -2-1-5-0 → Iterationen der Sukzessiven Einbeziehung: 1. $s(4)$ -0 2. $s(4)$ -1-0 3. $s(4)$ -2-1-0 4. $s(4)$ -2-1-5-0
9,39	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
10,00	Kunde 6 tritt auf; Startknoten $s=2$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(2)$ -6-1-5-0
10,41	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
10,81	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 1)
11,00	Kunde 7 tritt auf; Startknoten $s=1$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(1)$ -7-5-0
12,07	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
12,70	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
13,42	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Depot)
13,82	Depot erreicht

Tab. 4-5: Ablauf des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung bei Änderung aktueller Zug verboten

Erfolgt der Vergleich der Kennzahlen tatsächliche Tourlänge, durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden, schneidet die Variante *Änderung des aktuellen Zuges erlaubt* in diesem Beispiel immer besser ab als die Variante *Änderung des aktuellen Zuges verboten*. Die Tourlänge ist bei der zweiten Variante um 24 %, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden um 30 % und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden um 94 % größer.

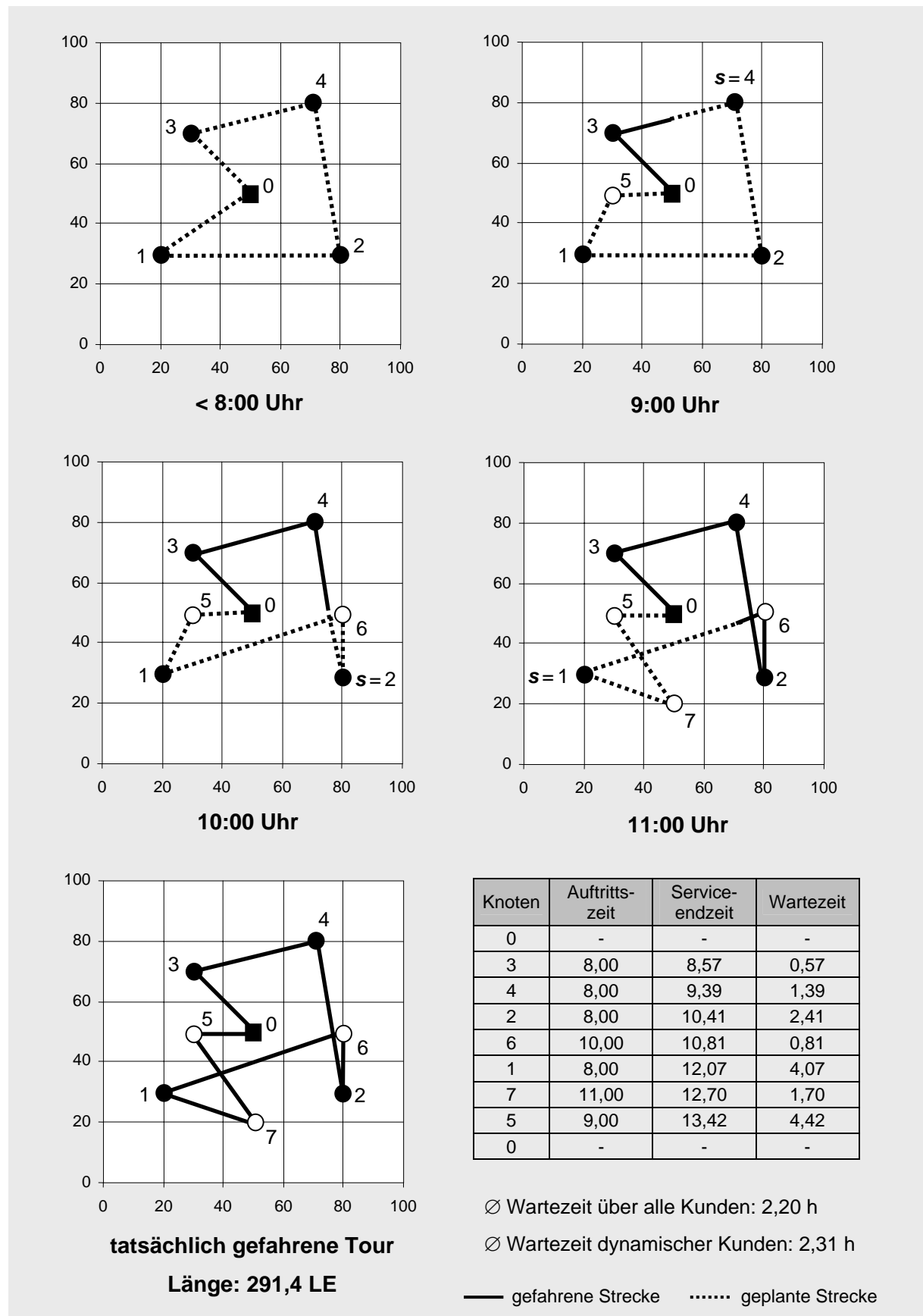


Abb. 4-10: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

4.2.4 Modifiziertes Verfahren von Christofides

Im Folgenden wird der Ablauf des modifizierten Verfahrens von Christofides beschrieben:

- Initialisierung: Bestimme Startknoten $v_s \in V$ ($s=1$) und alle noch nicht bediente Knoten $v_i \in V$, mit $i=2, \dots, n$; $v_0 \in V$ ist das Depot
 $\Rightarrow V = \{v_0, v_{1(s)}, v_2, \dots, v_n\}$;
- Schritt 1: Bestimme ein Minimalgerüst SST von Graph G .
- Schritt 2: Bestimme $V' = \{v_i \in V \mid \text{Knotengrad } KG_{v_i} \text{ ungerade in } SST \text{ f\"ur } i=2, \dots, n \text{ sowie } KG_{v_i} \text{ gerade in } SST \text{ f\"ur } i=0 \text{ und } i=1(s)\}$, $|V'|$ ist gerade;
 bilde vollständigen Graphen $G' = (V', E', c')$ mit
 c'_{ij} = Länge der kürzesten Entfernung zwischen Knoten v_i und v_j in G ; bestimme minimales Summen-Matching \tilde{E}^* in G' ;
 füge die Kanten von \tilde{E}^* zu SST hinzu $\rightarrow MSST$;
- Schritt 3: Bilde eine offene Eulersche Linie t in $MSST$ vom Startknoten v_s zum Zielknoten v_0 ; extrahiere die in der offenen Eulerschen Linie t eingebettete offene Hamiltonsche Linie K vom Startknoten v_s zum Zielknoten v_0 .

Der neue Algorithmus von Christofides für dynamische Rundreiseprobleme differiert bei der Auswahl der Knoten für das Matching vom klassischen Fall. Im Gegensatz zum Original, wo alle Knoten mit ungeradem Grad in das Matching eingehen, bilden bei der Modifizierung die Knoten mit ungeradem Grad dann die Grundlage des Matchings, wenn es sich dabei nicht um das Depot oder den Startknoten, der die aktuelle Fahrzeugposition darstellt, handelt. Weisen das Depot oder der Startknoten hingegen einen geraden Grad auf, gehen sie ihrerseits in das Matching ein. Durch diese abweichende Bedingung wird sichergestellt, dass der Startknoten und das Depot jeweils nur eine Verbindung zu der restlichen Knotenmenge aufweisen. Somit entsteht wie bei den anderen Verfahren eine Kette, die am Startknoten beginnt und am Depot endet.

Im Folgenden wird gezeigt, dass auch bei der Modifikation des klassischen Verfahrens von Christofides die Anzahl der Knoten, die in das Matching eingehen, gerade ist. Liegt eine gerade Anzahl an Matchingknoten vor, kann das Matching perfekt gelöst werden. Das perfekte Matching führt dazu, dass nach dem Einfügen der ermittelten Matchingkanten in den Ausgangsgraphen, alle Knoten einen geraden Grad besitzen. Diese Eigenschaft, dass alle Knoten einen geraden Grad aufweisen, stellt die notwendige Bedingung für die Existenz

einer geschlossenen Eulerschen Linie (Eulertour) dar. M sei die Menge der in das Matching eingehenden Knoten. In einem Graph ist jede Kante $[i, j]$ mit zwei Knoten i und j inzident. Deshalb hat jeder Graph eine gerade Anzahl an Knoten mit ungeradem Grad ($n_{\text{ungerade}} = 2k$). Beim Verfahren von Christofides bilden alle Knoten mit ungeradem Grad die Menge der in das Matching eingehenden Knoten: $|M| = n_{\text{ungerade}} = 2k$

Bei der modifizierten Variante des Verfahrens von Christofides für das dynamische Traveling Salesman Problem ist es das Ziel, einen Graph zu konstruieren, der zwei Knoten mit ungeradem Grad besitzt und bei dem sonst alle anderen Knoten einen geraden Grad aufweisen. Diese Eigenschaft erlaubt die Konstruktion einer offenen Eulerschen Linie, die an dem einen Knoten mit ungeradem Grad beginnt und an dem anderen Knoten mit ungeradem Grad endet. Dabei soll idealerweise die offene Eulersche Linie genau vom Startknoten zum Depot verlaufen. Um einen Graph zu erhalten, der eine offene Eulersche Linie besitzt, wird entsprechend der Verfahrensbeschreibung (siehe oben) ein Matching gelöst, in das alle Knoten mit ungeradem Grad eingehen, mit Ausnahme von Startknoten und Depot. Startknoten und Depot gehen in das Matching ein, wenn sie einen geraden Knotengrad besitzen. Somit weisen sie nach erfolgtem Matching als einzige Knoten einen ungeraden Grad auf, wodurch die offene Eulersche Linie genau an diesen beiden Knoten beginnt und endet.

Das durchzuführende Matching besteht aus einer geraden Anzahl an Knoten genauso wie im klassischen Fall. Im Folgenden wird diese Eigenschaft genauer erklärt, wobei drei Fälle zu unterscheiden sind:

- Der Startknoten und das Depot besitzen beide einen ungeraden Grad:

Die Anzahl der Elemente der Matchingknotenmenge M ist: $|M| = n_{\text{ungerade}} - 2 = 2k - 2$

- Der Startknoten und das Depot besitzen beide einen geraden Grad:

Die Anzahl der Elemente der Matchingknotenmenge M ist: $|M| = n_{\text{ungerade}} + 2 = 2k + 2$

- Einer der beiden Knoten, Startknoten oder Depot, besitzt einen ungeraden Grad, der andere einen geraden Grad:

Die Anzahl der Elemente der Matchingknotenmenge M ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} |M| &= n_{\text{ungerade}} - \text{der Knoten mit ungeradem Grad} + \\ &\quad \text{der Knoten mit geradem Grad} \\ &= n_{\text{ungerade}} - 1 + 1 = 2k - 1 + 1 = 2k \end{aligned}$$

Es zeigt sich, dass auch in diesem Fall eine gerade Anzahl an Matchingknoten vorliegt. Die Anzahl der Knoten mit ungeradem Grad, die in das Matching eingehen, ist zwar ungerade, da ein Knoten mit ungeradem Grad, entweder der Startknoten oder das Depot, nicht in das Matching aufgenommen werden, dafür kommt aber der andere der beiden Knoten, nämlich derjenige, der den geraden Grad besitzt, hinzu.

Wie gezeigt wurde, ist auch beim neu entwickelten modifizierten Verfahren nach Christofides immer ein Matching mit gerader Knotenanzahl zu lösen.

Im Folgenden wird auch der Ablauf des modifizierten Verfahrens nach Christofides anhand eines Beispiels vorgeführt. Abbildung 4-11 beinhaltet die Ausgangssituation, Tabelle 4-6 und Abbildung 4-12 zeigen das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt* und Tabelle 4-7 und Abbildung 4-13 präsentieren das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges verboten*. Das Beispiel ist mit dem von der Sukzessiven Einbeziehung identisch. Das Fahrzeug startet erneut 8:00 Uhr am Depot und fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h.

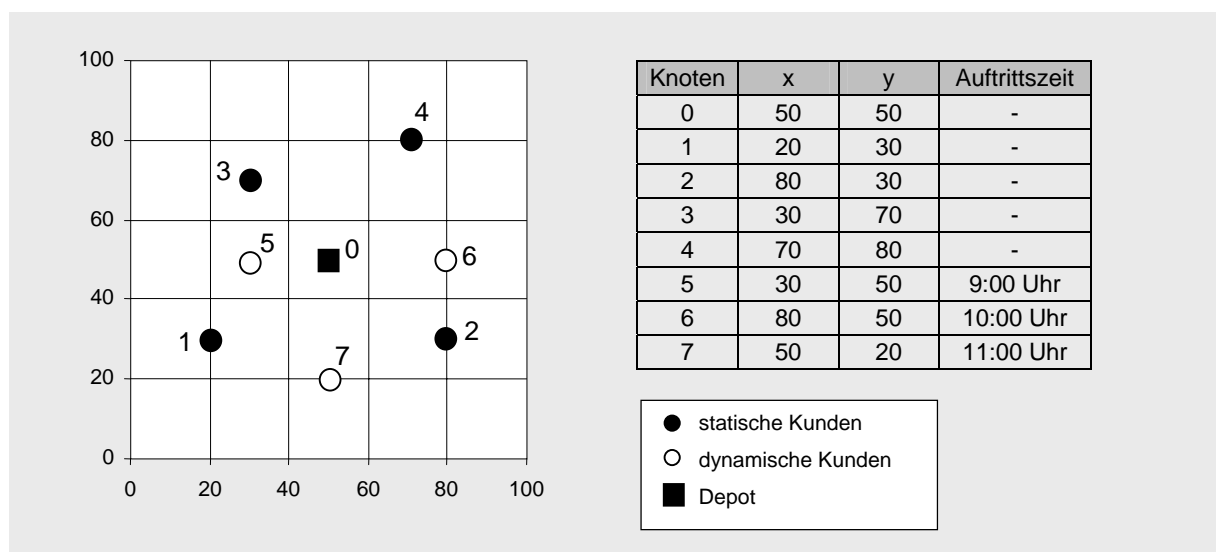
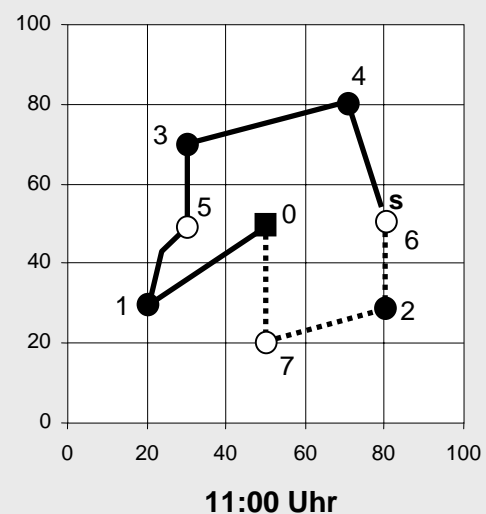
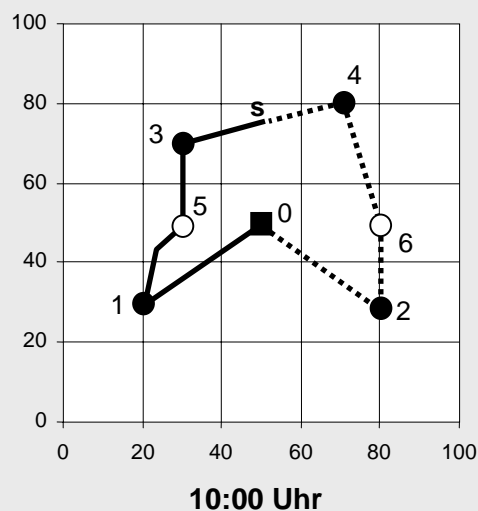
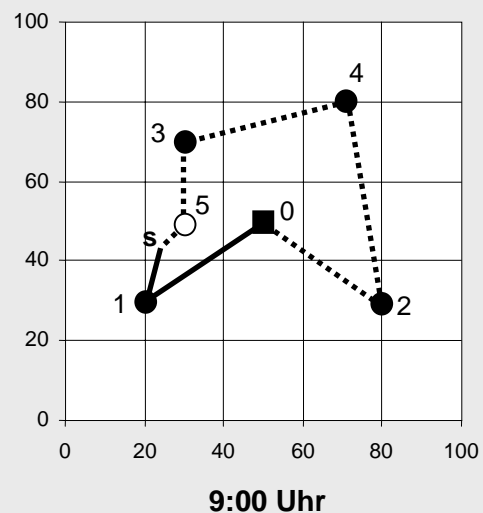
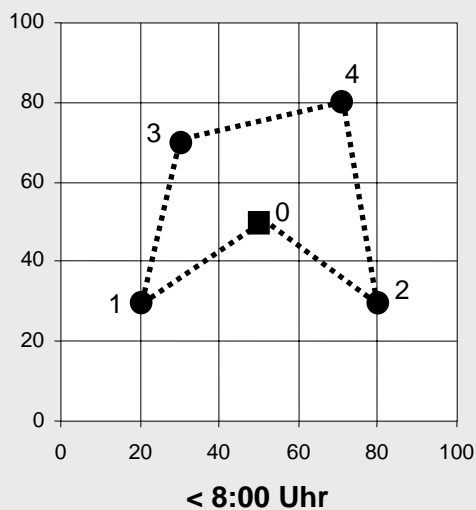


Abb. 4-11: Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Verfahren von Christofides

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-1-3-4-2-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 1)
8,72	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 3)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (23,38;43,53) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-5-3-4-2-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
9,19	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 3)
9,59	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
10,00	Kunde 6 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (50,12;75,03) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-4-6-2-0 keine Änderung des aktuellen Ziels

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
10,41	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
11,00	Kunde 7 tritt auf; Startknoten (79,33;52,00); als neue Rundreise ergibt sich: s-6-2-7-0 keine Änderung des aktuellen Ziels
11,04	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
11,44	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
12,07	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Depot)
12,67	Depot erreicht

Tab. 4-6: Ablauf des modifizierten Verfahrens von Christofides bei Änderung aktueller Zug erlaubt



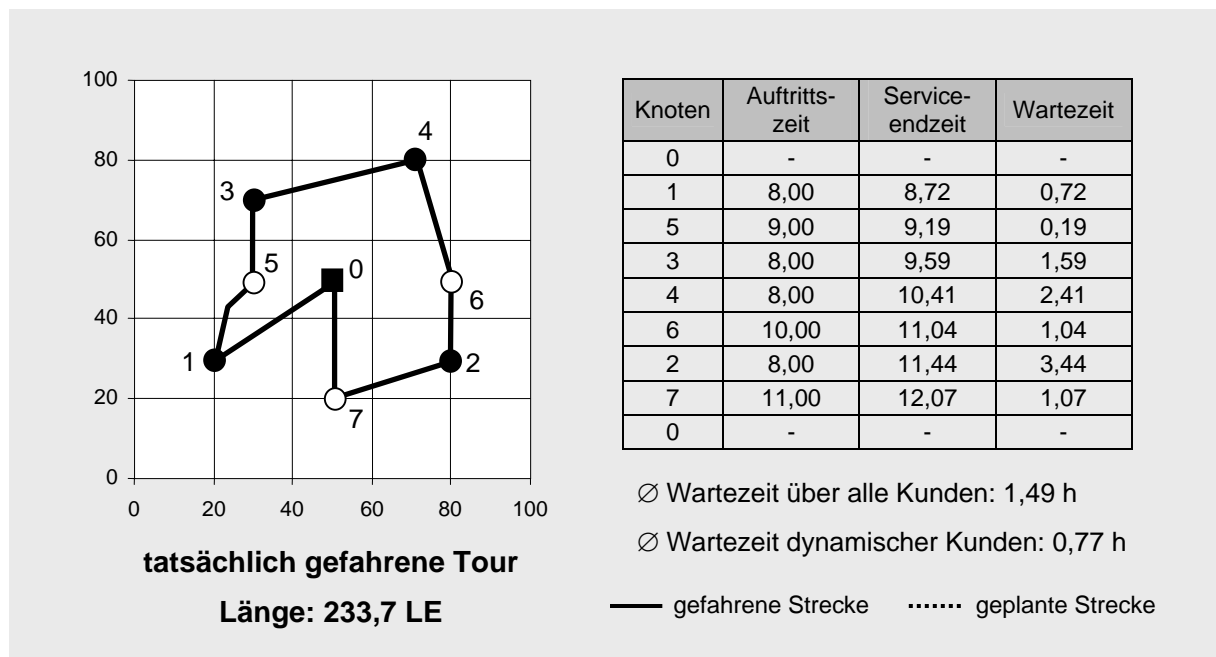


Abb. 4-12: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens von Christofides mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-1-3-4-2-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 1)
8,72	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 3)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (23,38;43,53); Startknoten für die Planung ist allerdings Knoten 3 ($s=3$), da der aktuelle Zug nicht verändert werden darf; als neue Rundreise ergibt sich: $s(3)$ -5-4-2-0
9,55	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
9,95	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
10,00	Kunde 6 tritt auf; Startknoten $s=4$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(4)$ -6-2-0
10,95	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
11,00	Kunde 7 tritt auf; Startknoten $s=6$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(6)$ -2-7-0
11,58	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
11,98	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
12,61	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Depot)
13,21	Depot erreicht

Tab. 4-7: Ablauf des modifizierten Verfahrens von Christofides bei Änderung aktueller Zug verboten

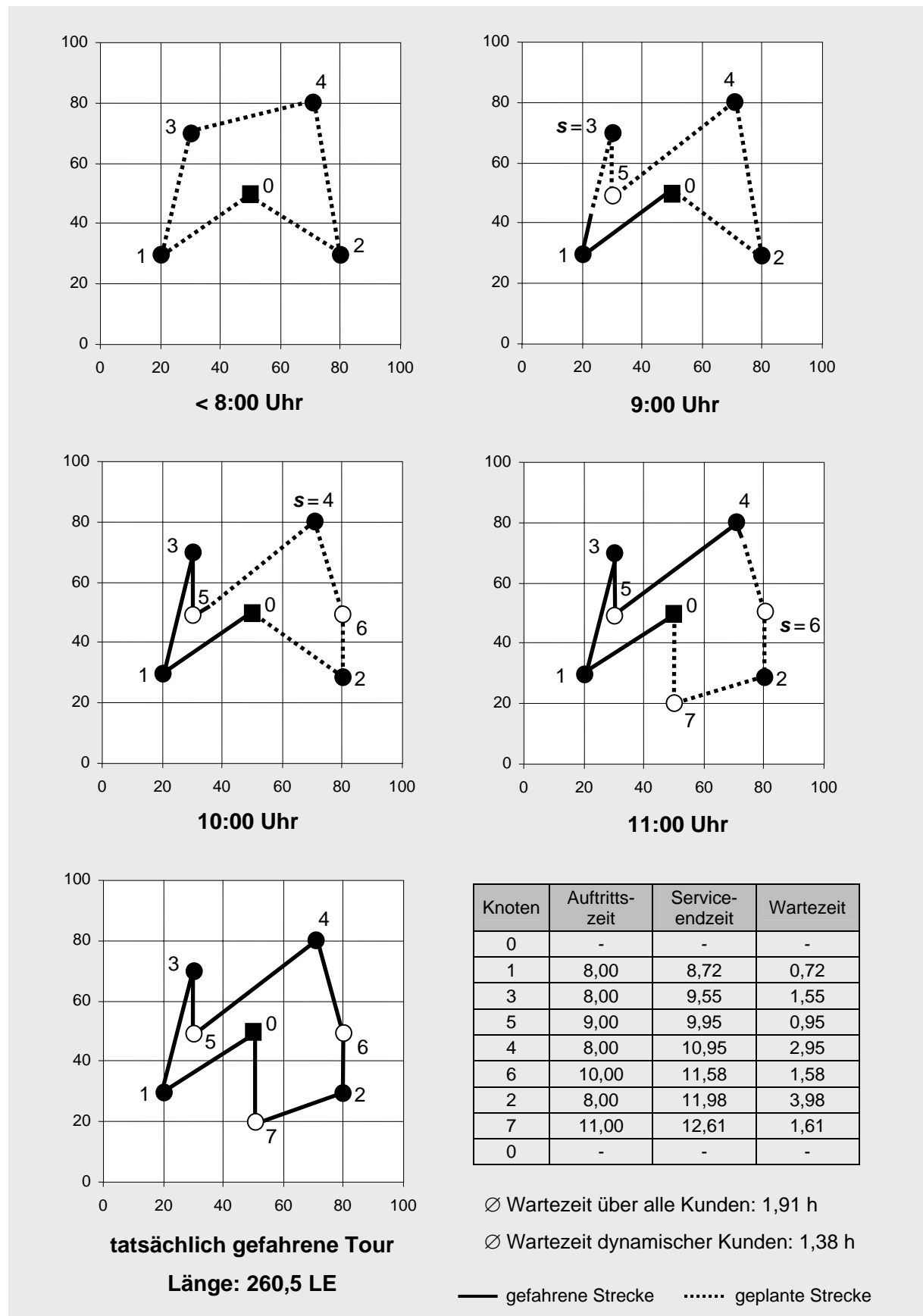


Abb. 4-13: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens von Christofides ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Im betrachteten Beispiel ist die Tourlänge bei der zweiten Variante (*Änderung des aktuellen Zuges verboten*) um 11 %, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden um 28 % und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden um 79 % größer als bei der ersten Variante (*Änderung des aktuellen Zuges erlaubt*).

Ein weiterer Algorithmus, der i. d. R. für Tourenplanungsprobleme eingesetzt wird, aber auch zur Lösung eines TSPs benutzt werden kann, da die Rundreiseplanung einen Spezialfall der Tourenplanung darstellt, ist das Savingsverfahrens. Im Folgenden erfolgt die Präsentation einer modifizierten Variante des Savingsverfahrens, die speziell die zusätzlichen Restriktionen des DTSPs berücksichtigt.

4.2.5 Modifiziertes Savingsverfahren

Folgenden Ablauf weist das modifizierte Savingsverfahren auf:

- Start:** Bestimme Startknoten s ($s = 1$) und alle noch nicht bedienten Knoten $i = 2, \dots, n$; 0 ist das Depot; $\Rightarrow V = \{0, 1(s), 2, \dots, n\}$
 Bilde Pendeltouren $T_i = [0, i, 0]$ für $i = 2, \dots, n$ mit Länge $d(T_i) = 2c_{0i}$ und eine Tour $T_1 = [s, 0]$ mit Länge $d(T_1) = c_{s0}$;⁴⁰¹
 Berechne Savings $s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$ ($i < j$);
 Sortiere Savings absteigend in einer Liste;
- Iteration:** Bestimme maximalen Savingswert $s_{i^* j^*}^{max}$ aus der absteigend sortierten Savingsliste (falls 2 Savingswerte identisch sind, wähle denjenigen, bei dem die Kunden die kleinere Entfernung zueinander haben);
 Im Falle der Erfüllung der folgenden Bedingungen wird eine Kombination von $i^* \in T_1$ und $j^* \in T_2$ zu einer kombinierten Tour $T_1 \times T_2$ ausgeführt:
- 1) i^* und j^* sind Randknoten in ihrer derzeitigen Tour T
 - 2) i^* und j^* sind noch nicht in ein und derselben Tour T enthalten
 - 3) i^* darf nicht Startknoten sein, wenn i^* bereits mit anderen Knoten (Kunden) kombiniert ist und j^* darf nicht Startknoten sein, wenn j^* bereits mit anderen Knoten (Kunden) kombiniert ist (der Startknoten darf nur einseitig (einmal) kombiniert werden)

⁴⁰¹ Der Begriff Tour wird im Rahmen dieser Arbeit folgendermaßen definiert: Eine Tour ist die Strecke, die von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt zurückgelegt wird. Sie enthält alle Kunden, die durch ein Fahrzeug auf dieser Strecke bedient werden können. Startknoten und Zielknoten können bei dieser Definition voneinander abweichen. Vgl. auch S. 32.

Bei Verbindung der beiden Touren T_1 und T_2 zur kombinierten Tour $T_1 \times T_2$ ergibt sich: $d(T_1 \times T_2) = d(T_1) + d(T_2) - s_{i^* j^*}^{max}$

Eliminiere $s_{i^* j^*}^{max}$ aus der Savingsliste

Abbruch: Savingsliste= \emptyset

Die Besonderheit bei der Durchführung des Savings-Verfahren ist, dass bei der Kombination von Knoten anhand der absteigend sortierten Savingswerte der Startknoten s nur einmal kombiniert wird und dann für weitere Kombinationen gesperrt ist. Durch die einmalige Verknüpfung wird erreicht, dass der Startknoten s Randkunde der Tour ist. Durch die anfängliche Bildung der Pendeltouren steht das Depot 0 am anderen Ende der Tour. Somit wird die Nebenbedingung, dass das Fahrzeug den Startknoten nur verlassen soll und nicht mehr zu diesem zurückkehrt sowie dass das Depot nur erreicht werden soll, erfüllt. Wie bei den drei anderen Heuristiken unterscheiden sich auch hier die zwei Varianten *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt* bzw. *verboten* in der Wahl des Startknotens und anhand des Zeitpunktes, ab dem die in der vorherigen Iteration geplante Tour geändert werden darf.

Die folgenden Abbildungen 4-14 bis 4-16 sowie die Tabellen 4-8 und 4-9 demonstrieren den modifizierten Savingsalgorithmus an einem Beispiel.

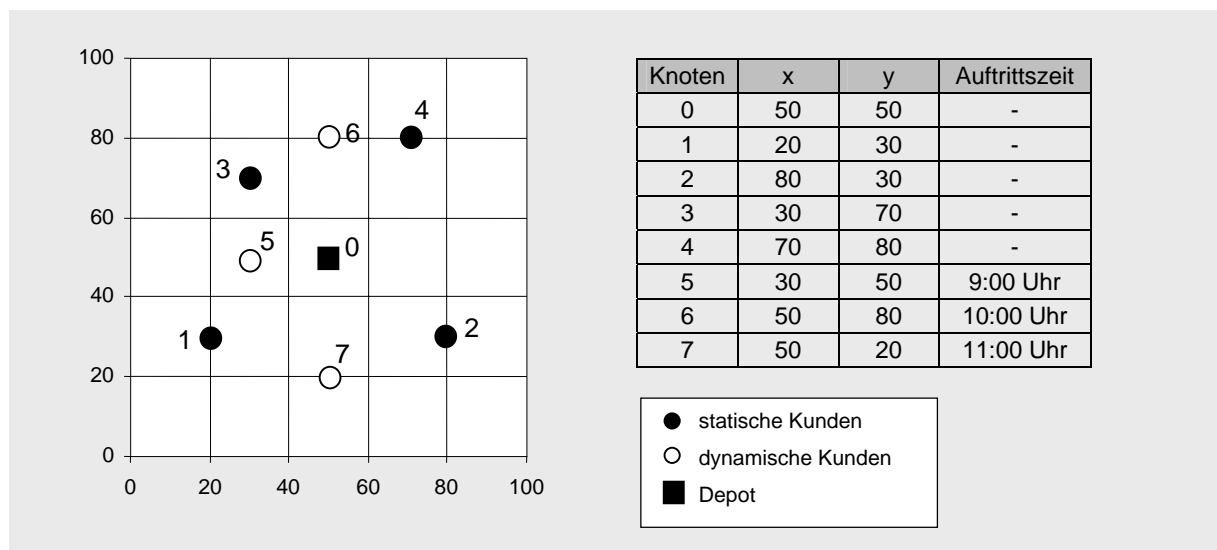


Abb. 4-14: Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden beim Beispiel für das modifizierte Savingsverfahren (DTSP)

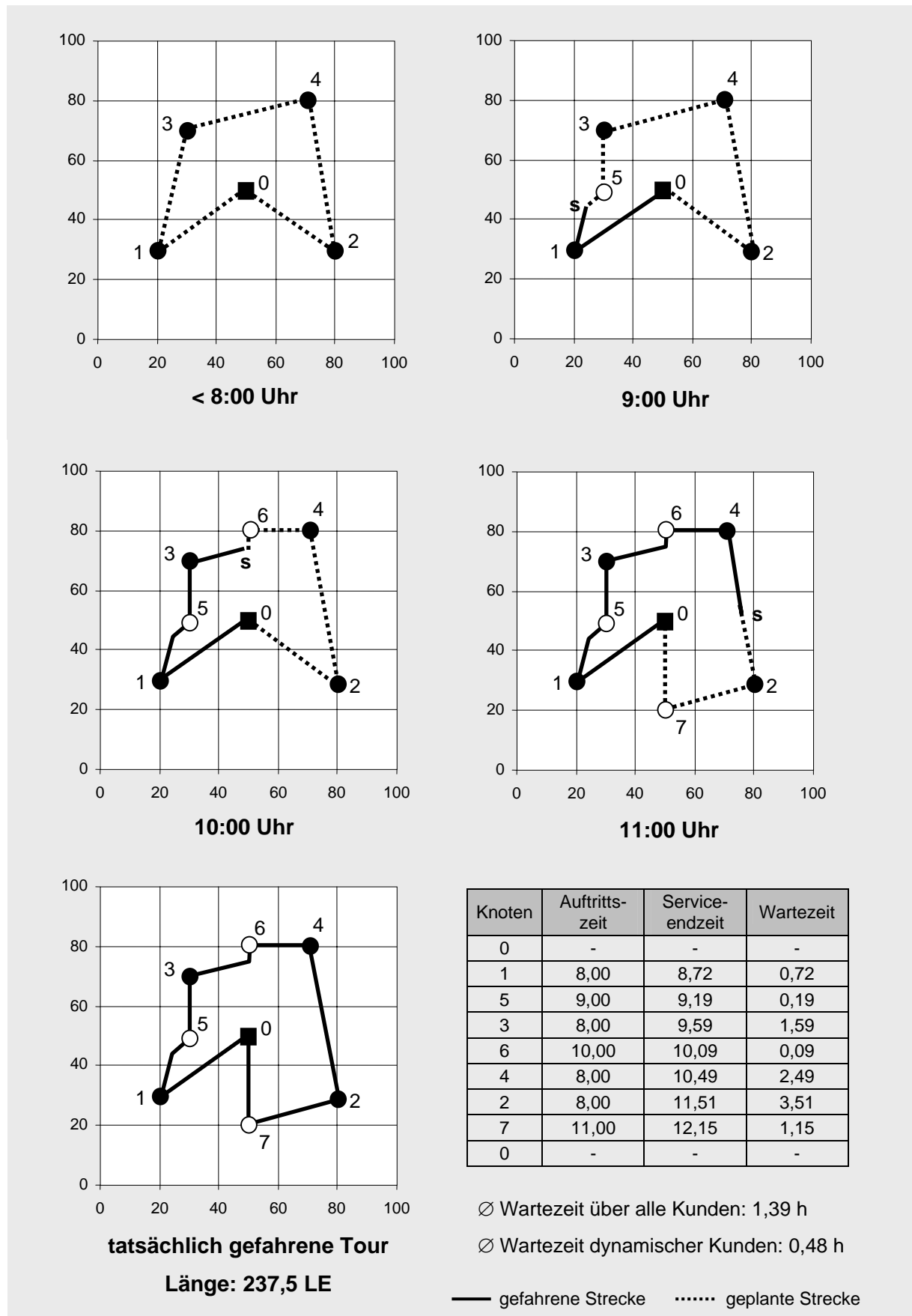


Abb. 4-15: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Der Vergleich beider Varianten zeigt, dass die Tourlänge bei der zweiten Variante (*Änderung des aktuellen Zuges verboten*) um 21 %, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden um 45 % und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden um 208 % größer als bei der ersten Variante (*Änderung des aktuellen Zuges erlaubt*) ist.

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-1-3-4-2-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 1)
8,72	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 3)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (23,38;43,53) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-5-3-4-2-0 → Iterationen des Savingsalgorithmus: 1. s_{s5} s-5-0 2. s_{s3} nicht möglich, da s gesperrt 3. s_{35} s-5-3-0 4. s_{34} s-5-3-4-0 5. s_{24} s-5-3-4-2-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
9,19	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 3)
9,59	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
10,00	Kunde 6 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (50,12;75,03) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-6-4-2-0 → Iterationen des Savingsalgorithmus: 1. s_{s6} s-6-0 2. s_{46} s-6-4-0 3. s_{s4} nicht möglich, da s gesperrt und beide schon in einer Tour sind 4. s_{24} s-6-4-2-0 Änderung des aktuellen Ziels (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
10,09	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
10,49	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
11,00	Kunde 7 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (75,98;50,11) → Startknoten für die Planung; als neue Rundreise ergibt sich: s-2-7-0 keine Änderung des aktuellen Ziels
11,51	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
12,15	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde Depot)
12,75	Depot erreicht

Tab. 4-8: Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) bei Änderung aktueller Zug erlaubt

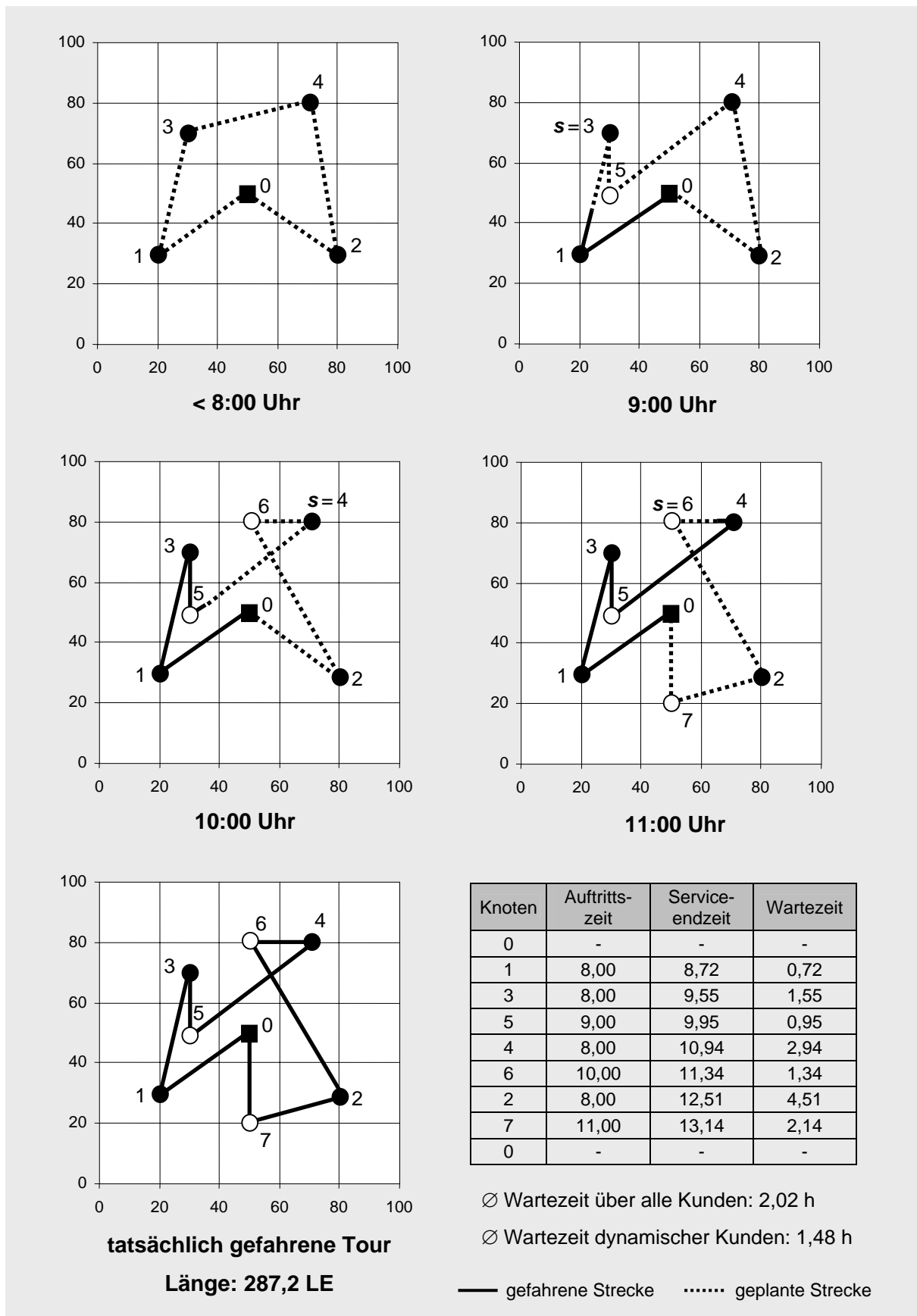


Abb. 4-16: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Rundreiseplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 0-1-3-4-2-0
8,00	Start des Fahrzeuges am Depot (aktuelles Ziel: Kunde 1)
8,72	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 3)
9,00	Kunde 5 tritt auf; das Fahrzeug befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Punkt (23,38;43,53); Startknoten für die Planung ist allerdings Knoten 3 ($s=3$), da der aktuelle Zug nicht verändert werden darf; als neue Rundreise ergibt sich: $s(3)$ -5-4-2-0 → Iterationen des Savingsalgorithmus: 1. s_{s5} $s(3)$ -5-0 2. s_{s4} nicht möglich, da $s(3)$ gesperrt 3. s_{24} 0-2-4-0 4. s_{45} $s(3)$ -5-4-2-0
9,55	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 5)
9,95	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 4)
10,00	Kunde 6 tritt auf; Startknoten $s=4$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(4)$ -6-2-0
10,94	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 6)
11,00	Kunde 7 tritt auf; Startknoten $s=6$; als neue Rundreise ergibt sich: $s(6)$ -2-7-0
11,34	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 2)
12,51	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde 7)
13,14	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel: Kunde Depot)
13,74	Depot erreicht

Tab. 4-9: Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DTSP) bei Änderung aktueller Zug verboten

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei allen in diesem Kapitel vorgestellten neuen Heuristiken die ermittelte Kette $[s(1), 2, \dots, n, 0]$, mit $s=1$, die für das Fahrzeug zu fahrende Route darstellt. Das bedeutet, es ist keine komplette Rundreise, sondern eine bestmögliche Kette von der aktuellen Fahrzeugposition zum Depot gesucht, die alle noch unbedienten Kunden enthält. Der Grund für eine derartig zu konstruierende Kette ist, dass die präsentierten Algorithmen bei der Lösung der Teilprobleme zum Einsatz kommen, wie im vorherigen Kapitel erklärt.

Da die gezeigten Beispiele noch kein Fazit bezüglich der prinzipiellen Anwendbarkeit und Vorteilhaftigkeit der Verfahren und ihrer Varianten Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt bzw. verboten zulassen, werden in Kapitel 4.5 die Ergebnisse von umfangreichen numerischen Test mit Beispielen von bis zu 200 Kunden präsentiert. Die Tests umfassen mehr als 1000 verschiedene Beispiele. Dabei wurden verschiedenste Parameterkombinationen gewählt. Neben der Gesamtkundenanzahl erfolgte die Variation der Anzahl dynamischer

Kunden (Grad der Dynamik), der Länge des Auftragseingangszeitraumes, der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Größe des Operationsgebietes.

4.2.6 Heuristiken mit Änderung aktueller Zug möglich vs. Heuristiken mit Änderung aktueller Zug nicht möglich

In diesem Kapitel soll auf die Besonderheit eingegangen werden, dass sowohl eine Heuristik mit der Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich* als auch eine Heuristik mit der Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* für ein gegebenes Beispiel das beste Ergebnis in Bezug auf die Lösung eines einzelnen Teilproblems erzielen kann. Dies liegt in der Vorgehensweise der Heuristiken begründet, wie im Folgenden gezeigt wird. Wäre die exakte Lösung jedes Teilproblems möglich, dann würden die Verfahrensvarianten *Änderung aktueller Zug nicht möglich* nie besser als die Verfahrensvarianten *Änderung aktueller Zug möglich* abschneiden, d. h. die Verfahrensvarianten *Änderung aktueller Zug möglich* wären mindestens gleich gut oder sogar besser als die Verfahrensvarianten *Änderung aktueller Zug nicht möglich*:

Exakte Lösung durchführbar:

Änderung aktueller Zug > Keine Änderung aktueller Zug

Dabei ist zu beachten, dass bei der Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich* nur dann der aktuelle Zug geändert wird, wenn sich dies auch als vorteilhaft erweist, d. h. die Änderung des aktuellen Zuges ist **nicht verpflichtend**.

Die in den Kapiteln 4.2.2 bis 4.2.5 und 4.3.2 aufgeführten Beispiele sind so gewählt, dass jeweils die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich* ein besseres Ergebnis als die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* erzielt. Da zur Lösung der Teilprobleme aufgrund der Komplexität des Traveling Salesman Problems und des Vehicle Routing Problems Heuristiken zum Einsatz kommen, gibt es jedoch Beispiele bei denen die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* besser abschneidet als die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich*. Folgende kleine Beispiele zu den Heuristiken modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung, modifiziertes Verfahren von Christofides und modifiziertes Verfahren Bester Nachfolger veranschaulichen dies (vgl. Abb. 4-17 bis 4-19). Dabei ist zu beachten, dass diese Beispiele speziell auf das Zielkriterium Tourlänge abzielen. Für die Zielkriterien durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden lassen sich adäquate Beispiele bilden. Für das modifizierte Savingsverfahren (DTSP) und das modifizierte Savingsverfahren (DVRP) wäre die Konstruktion derartiger Beispiele ebenfalls problemlos möglich, es wird an dieser Stelle aufgrund des Umfangs darauf verzichtet.

Beim Beispiel zum modifizierten Verfahren Bester Nachfolger (vgl. Abb. 4-17) ist zwar in der mittleren Grafik, die die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich* darstellt, zu erkennen, dass zunächst ein Abbiegen zum gerade aufgetretenen dynamischen Kunden kürzer ist, es sich aber in Bezug auf die gesamte Tour als Nachteil erweist. In der rechten Grafik von Abbildung 4-17, die die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* zeigt, wird ein besseres Ergebnis erzielt.

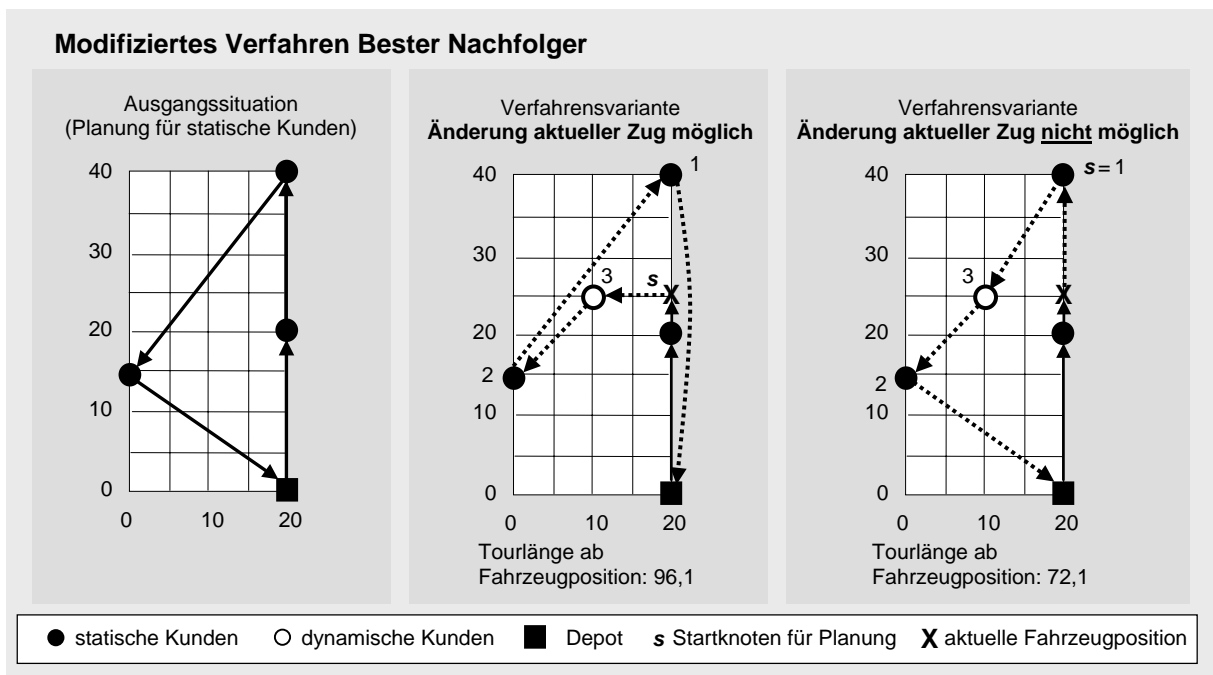


Abb. 4-17: Wirkungsweisevergleich der Verfahrensvarianten (*Änderung aktueller Zug möglich*/*Änderung aktueller Zug nicht möglich*) beim modifizierten Verfahren Bester Nachfolger zur Lösung der Teilprobleme

Das Beispiel zum modifizierten Verfahren von Christofides weist die gleiche Ausgangssituation (linke Grafik, Abb. 4-18) wie das Beispiel zum modifizierten Verfahren Bester Nachfolger auf. Für jede Verfahrensvariante wird das sich bei der Planung ergebende Minimalgerüst einschließlich der Matchingkanten dargestellt sowie die bei der Lösung des Teilproblems resultierende Lösung von der aktuellen Fahrzeugposition zum Depot. Auch hier ist zu erkennen, dass die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* ein besseres Ergebnis erzielt.

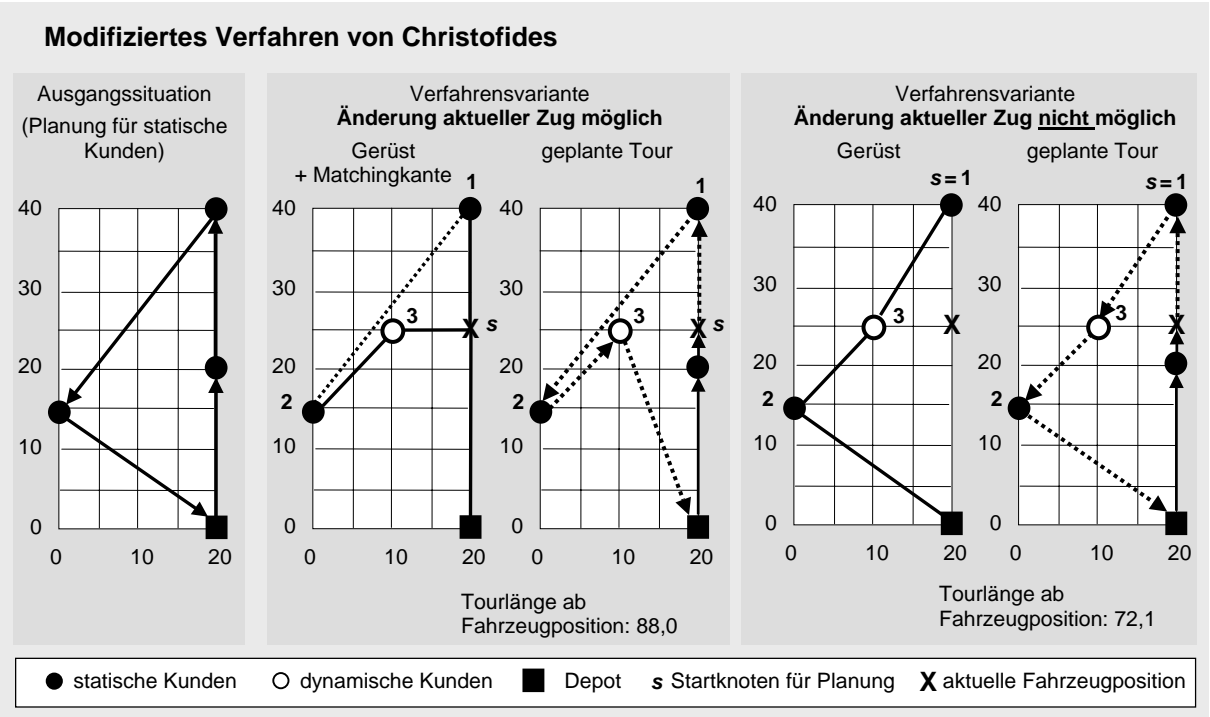


Abb. 4-18: Wirkungsweisevergleich der Verfahrensvarianten (*Änderung aktueller Zug möglich/Änderung aktueller Zug nicht möglich*) beim modifizierten Verfahren von Christofides zur Lösung der Teilprobleme

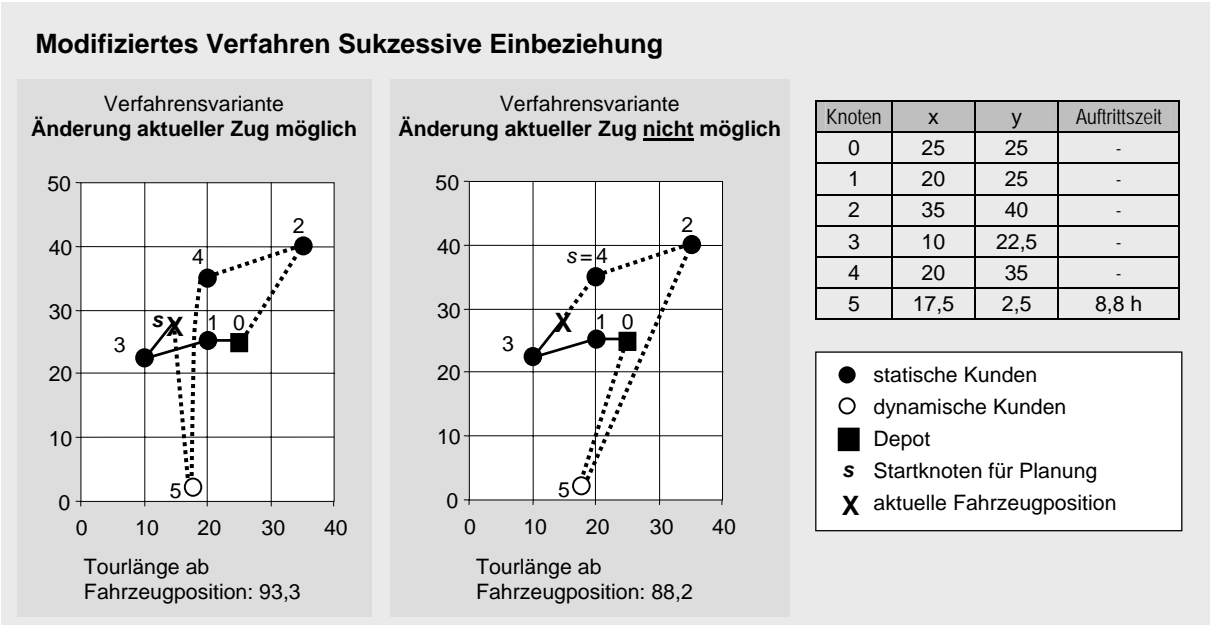


Abb. 4-19: Wirkungsweisevergleich der Verfahrensvarianten (*Änderung aktueller Zug möglich/Änderung aktueller Zug nicht möglich*) beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung zur Lösung der Teilprobleme

Auch die Abbildung 4-19 zum modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung zeigt ein Beispiel bei dem die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* besser abschneidet als die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich*. Die Iterationen des Planungsablaufes zum modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung sehen wie folgt aus:

Mit Änderung aktueller Zug:	Ohne Änderung aktueller Zug:
s-0	s(4)-0
s-5-0	s(4)-5-0
s-5-2-0	s(4)-2-5-0
s-5-4-2-0	

Nachdem hier gezeigt wurde, dass nicht eine der beiden Verfahrensvarianten (*Änderung aktueller Zug möglich*/*Änderung aktueller Zug nicht möglich*) der anderen grundsätzlich überlegen ist (sofern Heuristiken zum Einsatz kommen), enthält Kapitel 4.5.2 die Ergebnisse von parallel zur Entstehung dieser Arbeit durchgeführten umfangreichen Tests, mittels derer untersucht wurde, welche Verfahrensvariante im Durchschnitt über eine Vielzahl von Beispielen die besten Ergebnisse erzielt.

Da die in dieser Arbeit vorgestellten neu entwickelten Verfahren mit der Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges einen **zusätzlichen Freiheitsgrad** enthalten, sollte eine bessere Lösung des dynamischen Gesamtproblems möglich sein. Dem wirken zwei Faktoren entgegen. Zum einen werden zur Lösung der Teilprobleme nur Heuristiken benutzt. Das hat zur Folge, dass die Heuristiken mit der Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich*, wie zuvor gezeigt, bei einigen Beispielen bessere Ergebnisse erzielen. Zum anderen beeinflusst der Zufall die durch die Heuristiken erzielten Ergebnisse. Wurde ein Teilproblem durch Anwendung einer Heuristik gelöst, ist nicht bekannt, welche Daten zu welchem Zeitpunkt noch bekannt werden, d. h. wie viele Teilprobleme noch zu lösen sind. Es liegen keine Informationen über zukünftige Daten bzw. Ereignisse vor.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten umfangreichen Tests (vgl. Kapitel 4.5.2) sollen darüber Aufschluss geben, inwieweit die Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges Verbesserungen bewirkt bzw. inwieweit hemmt der Einfluss des Zufalls und der Nachteil, dass lediglich Heuristiken zum Einsatz kommen, die Erzielung besserer Verfahrensergebnisse.

4.3 Modell und Verfahren zum Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)

Gegenstand dieses Kapitels ist zunächst die allgemeine verbale Beschreibung des Ablaufes der dynamischen Tourenplanung. Danach erfolgt die Präsentation eines mathematischen Modells, mit dem die Teilprobleme des dynamischen Vehicle Routing Problems (Gesamtproblem) gelöst werden können. Genauso wie beim DTSP wird auch beim DVRP das Gesamtproblem im Rahmen einer rollierenden Planung in einzelne Teilprobleme zerlegt, die zu lösen sind, wenn ein dynamischer Kunde auftritt. Abschließend erfolgt die Vorstellung heuristischer Verfahren zur Lösung des DVRPs. Dabei werden eine modifizierte Variante des Savingsverfahrens und vier Varianten eines modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung vorgestellt.

4.3.1 Ablauf und Modell zum Dynamic Vehicle Routing Problem

Basierend auf dem zuvor allgemein geschilderten rollierenden Planungskonzept (vgl. Abb. 4-1) ergibt sich folgender **Ablauf der dynamischen Tourenplanung**:

Zum Start der rollierenden Planung (erste Planung) besteht die Knotenmenge V nur aus den statischen Kunden i , mit $i = 1, \dots, n$, und dem Depot (Knoten 0). Das Depot ist sowohl Ausgangs- als auch Endpunkt der zu planenden Touren. Das Problem wird gelöst - als Ergebnis liegt ein gültiger Tourenplan vor, bei dem alle Touren am Depot beginnen und enden. Kommen weitere Kunden (Knoten) hinzu, findet die nächste Planung der rollierenden Planung statt. Die Ausführung des aktuell gültigen Tourenplans wird unterbrochen. Die Knotenmenge V vergrößert sich um den oder die neuen Kunden und vermindert sich um die bis zum aktuellen Zeitpunkt fertig bedienten Kunden.⁴⁰² Des Weiteren muss beachtet werden, dass noch die Startknotenmenge S zu berücksichtigen ist, die in die Knotenmenge V aufgenommen wird. Für jedes auf Tour befindliche Fahrzeug gibt es für dessen aktuelle Position einen Startknoten $s \in S$. Hierbei kann es sich um einen Knoten i (Kunden) handeln, bei dem das Fahrzeug gerade steht, oder es muss ein zusätzlicher Knoten generiert werden, wenn sich das Fahrzeug auf der Kante zwischen zwei Knoten i und j befindet. Das Problem wird unter Verwendung der neuen Datenbasis gelöst - als Ergebnis liegt ein Tourenplan vor, bei dem die Touren an den Startknoten $s \in S$ beginnen und am Depot enden. Gegebenenfalls können bei der Planung auch neue Touren konstruiert werden, die am Depot beginnen und enden. Dies ist dann der Fall, wenn so viele dynamische Kunden hinzugekommen sind, dass die Fahrzeugkapazität der bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge nicht mehr ausreicht. Somit starten weitere Fahrzeuge am Depot. Ferner sind auch Touren denkbar, bei denen Fahrzeu-

⁴⁰² Eine eventuelle Umnummerierung der Knoten durch das Hinzukommen und Herausnehmen von Kunden aus der Datenbasis kann bei der Formulierung und Lösung eines jeden Teilproblems notwendig werden.

ge auf direktem Weg von einem Startknoten zum Depot fahren. Dieser Fall trifft zu, wenn die Fahrzeugkapazität durch bereits bediente Kunden ausgeschöpft ist. Der bestimmte Tourenplan gilt bis zum Auftritt eines dynamischen Kunden, d. h. bis zur nächsten Planung. Erreicht das letzte Fahrzeug das Depot, ist das dynamische Tourenplanungsproblem gelöst.

Das **mathematische Modell**, das zur Beschreibung der statischen Teilprobleme dient, hat folgende Gestalt:

Gegeben sei ein zusammenhängender bewerteter Graph $G=(V,E,c)$ mit der Knotenmenge V , der Kantenmenge E und den Bewertungen c_{ij} . Die Bestimmung der Distanzen c_{ij} zwischen allen Knoten $i, j \in V$ mit $i < j$ erfolgt aus Vereinfachungsgründen unter Verwendung der euklidischen Distanz $c_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ (mit (x_i, y_i) und (x_j, y_j) Koordinaten der Kundenstandorte i und j), damit alle Werte c_{ij} vorliegen. Der Graph G ist für jedes Teilproblem neu zu bestimmen, da sich V und E durch das Hinzukommen von neuen Kunden und der Erledigung von Kundenaufträgen sowie der Veränderung der aktuellen Fahrzeugpositionen ändern.

Variablen und Parameter:

- V Knotenmenge, mit $V = \{0, \dots, n\}$, bestehend aus der Menge der aktuell noch nicht bedienten Kunden A und der Menge der Startpunkte $S \rightarrow V = A \cup S \cup \{0\}$; Depot mit $i = 0$
- E Kantenmenge, $E = \{[i, j] : i, j \in V, i < j\}$
- c_{ij} Bewertung der Kante von Knoten i zu Knoten j
- S Menge der zusätzlichen Startknoten s neben dem Depot; diese Punkte können von den Fahrzeugen nur verlassen werden; die Startknoten sollten die Bezeichnung $i = 1, \dots, |S|$ erhalten, damit eine Zuordnung zu den Fahrzeugen $k = 1, \dots, |S|$ möglich ist
- F Menge der Fahrzeuge, $F = \{1, \dots, p\}$; es gilt: $p > |S|$
- x_{ijk} Binärvariable, mit $i, j = 0, \dots, n$ und $k = 1, \dots, p$ und $i < j$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{falls Fahrzeug } k \text{ die Kante } [i, j] \text{ benutzt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$
- H Teilmenge von V , die zur Überprüfung auf Kurzzyklen benutzt wird
- b_i Bedarf des Knotens i ; $b_i = 0$ für $i \in S \setminus A$ und $b_i > 0$ für $i \in A$
- cap_k Kapazität des Fahrzeuges $k \in K$; die Fahrzeuge $k = 1, \dots, |S|$ erhalten die Restkapazität, der bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge; alle anderen Fahrzeuge $k > |S|$ bekommen die Kapazität des homogenen Fuhrparks Q zugeordnet
- y_{ik} Binärvariable, mit $i = 1, \dots, n$ und $k = 1, \dots, p$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{falls Fahrzeug } k \text{ Knoten } i \text{ bedient} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Formale Beschreibung des Modells⁴⁰³

$$\text{ZF: } \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} \sum_{k=1}^p x_{ijk} \rightarrow \min \quad (4.10)$$

$$\text{NB: } \sum_{h=0}^{i-1} \sum_{k=1}^p x_{hik} + \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=1}^p x_{ijk} = 2 \quad \text{für alle } i \in V \setminus S \setminus \{0\} \quad (4.11)$$

$$\sum_{h=0}^{i-1} \sum_{k=1}^p x_{hik} + \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=1}^p x_{ijk} = 1 \quad \text{für alle } i \in S \quad (4.12)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{\substack{j \in V \setminus H \\ i < j}} \sum_{k=1}^p x_{ijk} + \sum_{i \in V \setminus H} \sum_{\substack{j \in H \\ i < j}} \sum_{k=1}^p x_{ijk} \geq a \quad a = \begin{cases} 1 & , \text{wenn } |S \cap H| > 0 \\ 2 & , \text{wenn } |S \cap H| = 0 \end{cases} ; H \subseteq V \setminus \{0\}; |H| \geq 2 \quad (4.13)$$

$$\sum_{h=0}^{i-1} x_{hik} + \sum_{j=i+1}^n x_{ijk} = 2 \cdot y_{ik} \quad \text{für alle } i \in V \setminus S \setminus \{0\} \text{ und alle } k \in F \quad (4.14)$$

$$\sum_{h=0}^{i-1} x_{hik} + \sum_{j=i+1}^n x_{ijk} = y_{ik} \quad \text{für alle } i \in S \text{ und alle } k \in F \quad (4.15)$$

$$\sum_{i=1}^n b_i \cdot y_{ik} \leq \text{cap}_k \quad \text{für alle } k \in F \quad (4.16)$$

$$y_{ii} = 1 \quad \text{für alle } i \in S \quad (4.17)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \text{für alle } i, j \in V \text{ und alle } k \in F \quad (4.18)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \text{für alle } i \in V \setminus \{0\} \text{ und alle } k \in F \quad (4.19)$$

Erklärung des Modells

Die Zielfunktion (Ausdruck 4.10) minimiert die Gesamtlänge oder Gesamtfahrzeit aller Touren, je nach dem was die Bewertung c_{ij} angibt. Die Nebenbedingungen (Ausdrücke (4.11)-(4.17)) gewährleisten, dass jeder Kunde genau einmal erreicht wird, dass die Touren entweder an einem Startpunkt oder am Depot beginnen und dass alle Touren am Depot enden. Des Weiteren werden durch die Nebenbedingungen Kurzzyklen vermieden und die Fahrzeugkapazität nicht überschritten. Nebenbedingung (4.11) stellt sicher, dass jeder Knoten $i \in V$, mit Ausnahme des Depots (Knoten 0) und der Startknoten $s \in S$, genau über zwei Verbindungen mit den restlichen Knoten der Menge V verbunden ist. Das bedeutet, jeder Kno-

⁴⁰³ Im Anhang A4 ist das Modell ausführlich für ein Beispiel aufgeschrieben. (Beispiel zum modifizierten Savingsverfahren (DVRP), vgl. Abbildung 4-18: Grafik 3 (9:00 Uhr)).

ten wird genau einmal besucht. Analog dazu gewährleistet (4.12), dass jeder Startknoten $i \in S$ nur verlassen werden kann, indem nur eine Verbindung zu den restlichen Knoten V besteht. Die Vermeidung von Kurzzyklen, die das Depot nicht enthalten, garantiert (4.13). Die Nebenbedingungen (4.14) und (4.15) veranlassen das Setzen der Variable y_{ik} ,⁴⁰⁴ die in Nebenbedingung (4.16) gewährleistet, dass die Fahrzeugkapazitäten nicht überschritten werden. Die Zuordnung der bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge einschließlich ihrer Restkapazität zu den künstlich geschaffenen Startknoten erfolgt mittels Nebenbedingung (4.17). (Hierzu ist die Bezeichnung der Startknoten mit $i = 1, \dots, |S|$ wichtig.) Die Nebenbedingungen (4.18) und (4.19) geben an, dass die Entscheidungsvariablen x_{ijk} und y_{ik} binär sind. Zur Anwendung des Modells müssen die Anzahl der Knoten (= Anzahl unbediente Kunden + Depot + Anzahl Startknoten), der Bedarf je Kunde (Knoten), die Bewertungen c_{ij} der Kanten und die Restkapazitäten der Fahrzeuge gegeben sein.

Zur Lösung des Modells können modifizierte klassische heuristische Algorithmen angewendet werden. Zuerst erfolgt die Vorstellung des modifizierten Savingsverfahrens. Im Anschluss werden vier Varianten eines modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung erläutert.

4.3.2 Modifiziertes Savingsverfahren

Im Folgenden wird der Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens beschrieben. Zu beachten ist, dass jetzt auch Standzeiten der Fahrzeuge beim Kunden berücksichtigt werden.

Daten: Knoten $i \in V$ mit Bedarf b_i , Depot 0, Entfernungen c_{ij} (mit $i, j \in V$), Fahrzeugkapazität cap_k (unbeschränkte Anzahl Fahrzeuge am Depot vorhanden), maximale Kapazität der Fahrzeuge Q (am Depot liegt ein homogener Fuhrpark vor)

V Knotenmenge mit $i, j \in V$

A Menge der aktuell noch nicht fertig bedienten Kunden (alle Kunden bei denen der Service noch nicht ausgeführt oder beendet ist)

S Menge der Startpunkte (Startpunkte sind Kunden, die bereits erreicht sind, d. h. bei denen der Service begonnen hat, und Punkte auf Kanten zwischen zwei Kunden (Knoten) oder dem Depot und einem Kunden (Knoten); Startpunkte haben einen Bedarf $b_i = 0$, außer bei $i \in A$)

→ Kunden, die bereits durch ein Fahrzeug erreicht wurden, bei denen der Service aber noch nicht abgeschlossen ist, gehören sowohl der Menge A als

⁴⁰⁴Die Nebenbedingungen (4.14) und (4.15) stellen zudem sicher, dass jeder Kunde genau einem Fahrzeug zugeordnet wird.

auch der Menge S an. Ursprünglicher Bedarf b_i (mit $i \in V$) bleibt bestehen.

$$V = A \cup S \cup \{0\}$$

- Start:
- Jedem Knoten wird ein Fahrzeug nach folgender Regel zugeordnet:
 - alle Knoten der Menge A erhalten ein Fahrzeug mit Kapazität $cap_k = Q$
 - alle Knoten der Menge S erhalten ein Fahrzeug, bei dem sich die Kapazität aus Q abzüglich der bereits bedienten Kunden, die sich auf der Tour zu diesem Startpunkt befunden haben, bestimmt
 - Jeder Knoten $i \in V \setminus \{0\}$ ist in einer Tour T_i enthalten, welche entweder eine Pendeltour oder eine Kurzkette darstellt.⁴⁰⁵ Wenn $i \in A$ handelt es sich um eine Pendeltour, die am Depot beginnt. Bei $i \in S$ liegt eine Kurzkette vor, die am Startpunkt beginnt (ist $i \in A$ und $i \in S$, dann beginnt die Tour ebenfalls am Startpunkt). In beiden Fällen endet die Tour am Depot.
 - Benötigte Kapazität $q(T_i)$ der Tour T_i : $q(T_i) = b_i$
 Länge $d(T_i)$ der Pendeltour T_i : $d(T_i) = 2c_{0i}$ (für $\forall i \in (A \setminus S)$, $d(T_i) = c_{0i}$ für $i \in S$)
 - Berechne Savings $s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$ ($i < j$)
 - Sortiere Savings absteigend in einer Liste
- Iteration:
- Bestimme maximalen Savingswert $s_{i^*j^*}^{max}$ aus Savingsliste
 (falls 2 Savingswerte identisch sind, wähle denjenigen, bei dem die Kunden die kleinere Entfernung zueinander haben)
 - Im Falle der Erfüllung der folgenden Bedingungen wird eine Kombination von $i^* \in T_1$ und $j^* \in T_2$ zu einer kombinierten Tour $T_1 \times T_2$ ausgeführt:
 - 1) i^* und j^* sind Randknoten in ihrer derzeitigen Tour T
 - 2) i^* und j^* sind noch nicht in ein und derselben Tour T enthalten
 - 3) der Gesamtbedarf aller Kunden der neuzubildenden Tour ist kleiner oder gleich dem Minimum aus den beiden zugeordneten Fahrzeugkapazitäten von i^* und j^* $\rightarrow q(T_1) + q(T_2) \leq \min(cap(T_1), cap(T_2))$
 - 4) nicht beide Knoten i^* und j^* sind Startpunkte (höchstens ein Startpunkt je Tour)
 - 5) $i^* \in T_1$ darf kein Startpunkt sein, wenn in T_2 schon ein Startknoten enthalten ist

⁴⁰⁵ Der Begriff Tour wird im Rahmen dieser Arbeit folgendermaßen definiert: Eine Tour ist die Strecke, die von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt zurückgelegt wird. Sie enthält alle Kunden, die durch ein Fahrzeug auf dieser Strecke bedient werden können. Startknoten und Zielknoten können bei dieser Definition voneinander abweichen. Vgl. auch S. 32.

$j^* \in T_2$ darf kein Startpunkt sein, wenn in T_1 schon ein Startknoten enthalten ist

in T_1 darf kein Startpunkt sein, wenn in T_2 ein Startpunkt ist

in T_2 darf kein Startpunkt sein, wenn in T_1 ein Startpunkt ist

(nach der Kombination von T_1 und T_2 darf nur ein Startpunkt in der neuen Tour $T_1 \times T_2$ enthalten sein)

- 6) i^* darf kein Startpunkt sein, wenn i^* bereits mit anderen Knoten kombiniert ist und j^* darf kein Startpunkt sein, wenn j^* bereits mit anderen Knoten kombiniert ist (ein Startpunkt darf nur einseitig (einmal) kombiniert werden)

Bei Verbindung der beiden Touren T_1 und T_2 zur kombinierten Tour $T_1 \times T_2$ ergibt sich:

- $q(T_1 \times T_2) = q(T_1) + q(T_2)$
- $d(T_1 \times T_2) = d(T_1) + d(T_2) - s_{i^* j^*}^{max}$
- das Fahrzeug mit der kleineren Fahrzeugkapazität wird der Tour $T_1 \times T_2$ zugeordnet
- Eliminiere $s_{i^* j^*}^{max}$ aus Savingsliste

Abbruch: Savingsliste = \emptyset

Zusammenfassend können folgende Besonderheiten des modifizierten Savingsverfahrens gegenüber dem klassischen Savingsverfahren genannt werden:

- für jede Tour ist ein Startpunkt zu beachten, der die aktuelle Position eines Fahrzeuges angibt; im Gegensatz zur dynamischen Rundreiseplanung (ein Startpunkt und ein Zielpunkt (Depot)) gehen in die Planung mehrere Startknoten ein (mehrere Startpunkte und ein Zielpunkt (Depot))
- zur Bestimmung der Startknoten wird in die aktuellen Züge der Fahrzeuge eingegriffen
- bei der Kombination der Touren ist zu beachten, dass pro Tour nur ein Startknoten vorkommen darf, d. h. enthält eine Kombitour bereits einen Startknoten, darf kein weiterer Startknoten oder keine andere Kombitour, die bereits einen Startknoten enthält, zu dieser Tour hinzugefügt werden
- bei der Bestimmung der Datenbasis für die einzelnen Teilprobleme muss für jedes Fahrzeug, das bereits unterwegs und somit inzident mit einem Startknoten ist, die Restkapazität bestimmt werden, welche dann in den neuen Planungslauf eingeht; in- folgedessen ergibt sich ein Problem mit heterogenem Fuhrpark

- im Unterschied zum traditionellen Savingsverfahren wird das Depot (i. d. R. Knoten 0) nicht vorn und hinten zur Komplettierung der Tour angehängen, sondern nur auf der dem Startknoten entgegengesetzten Seite
- die Fahrtrichtung der Touren, die einen Startknoten enthalten, ist determiniert; die Tour beginnt am Startknoten und endet am Depot

Die Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens soll an einem Beispiel demonstriert werden. Abbildung 4-20 veranschaulicht die Datengrundlage des Beispiels. Das Kundengebiet hat wieder eine Ausdehnung von 100 LE x 100 LE, wobei eine LE einem Kilometer entspricht. Zur Bestimmung der Entfernung wird erneut die Koordinatenmethode verwendet. Die Kunden 1 bis 8 sind statisch und die Kunden 9 bis 11 dynamisch. Kunde 9 tritt um 8:30 Uhr, Kunde 10 um 9:00 Uhr und Kunde 11 um 10:00 Uhr auf. Die Fahrzeuge starten 8:00 Uhr am Depot und fahren mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h. Die maximale Kapazität je Fahrzeug beträgt 5 ME. Bei jedem Kunden hat ein Fahrzeug eine vom Bedarf unabhängige Standzeit von 10 Minuten. Für die Bestimmung der Wartezeiten wird als Auftrittszeit für die statischen Kunden wieder 8:00 Uhr angenommen, was dem Startzeitpunkt der Fahrzeuge am Depot entspricht.

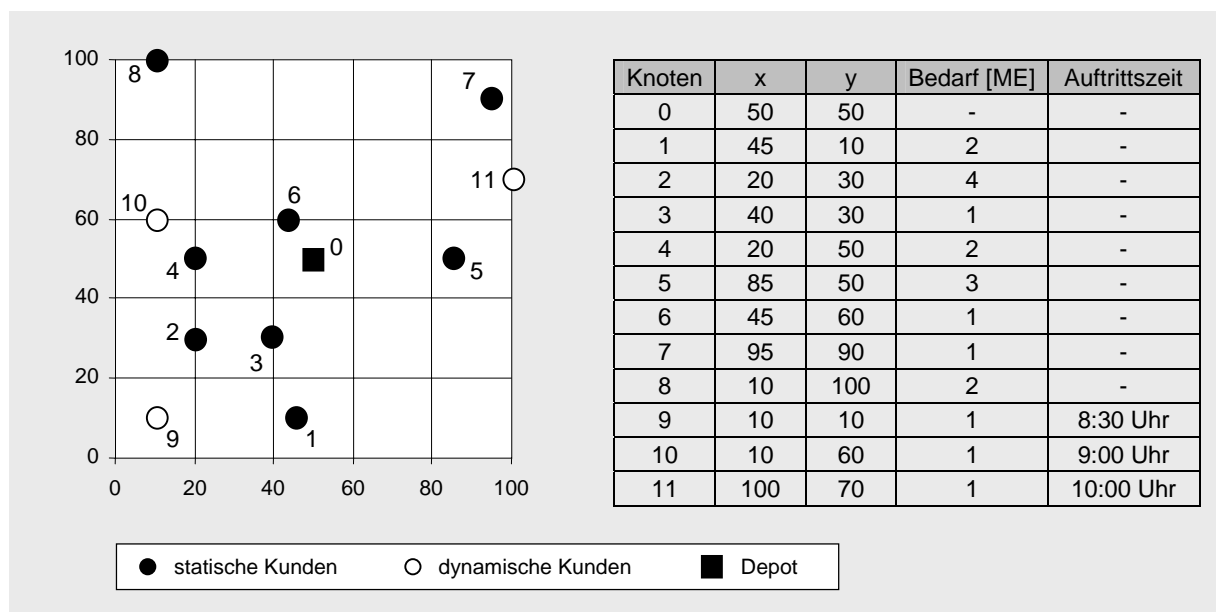


Abb. 4-20: Verteilung und Auftrittszeitpunkt der Kunden für das modifizierte Savingsverfahren (DVRP)

Die Abbildung 4-21 und die Tabelle 4-10 zeigen das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges erlaubt*. Die Abbildung 4-22 und die Tabelle 4-11 präsentieren das Ergebnis und den Verfahrensablauf für die Variante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich*.

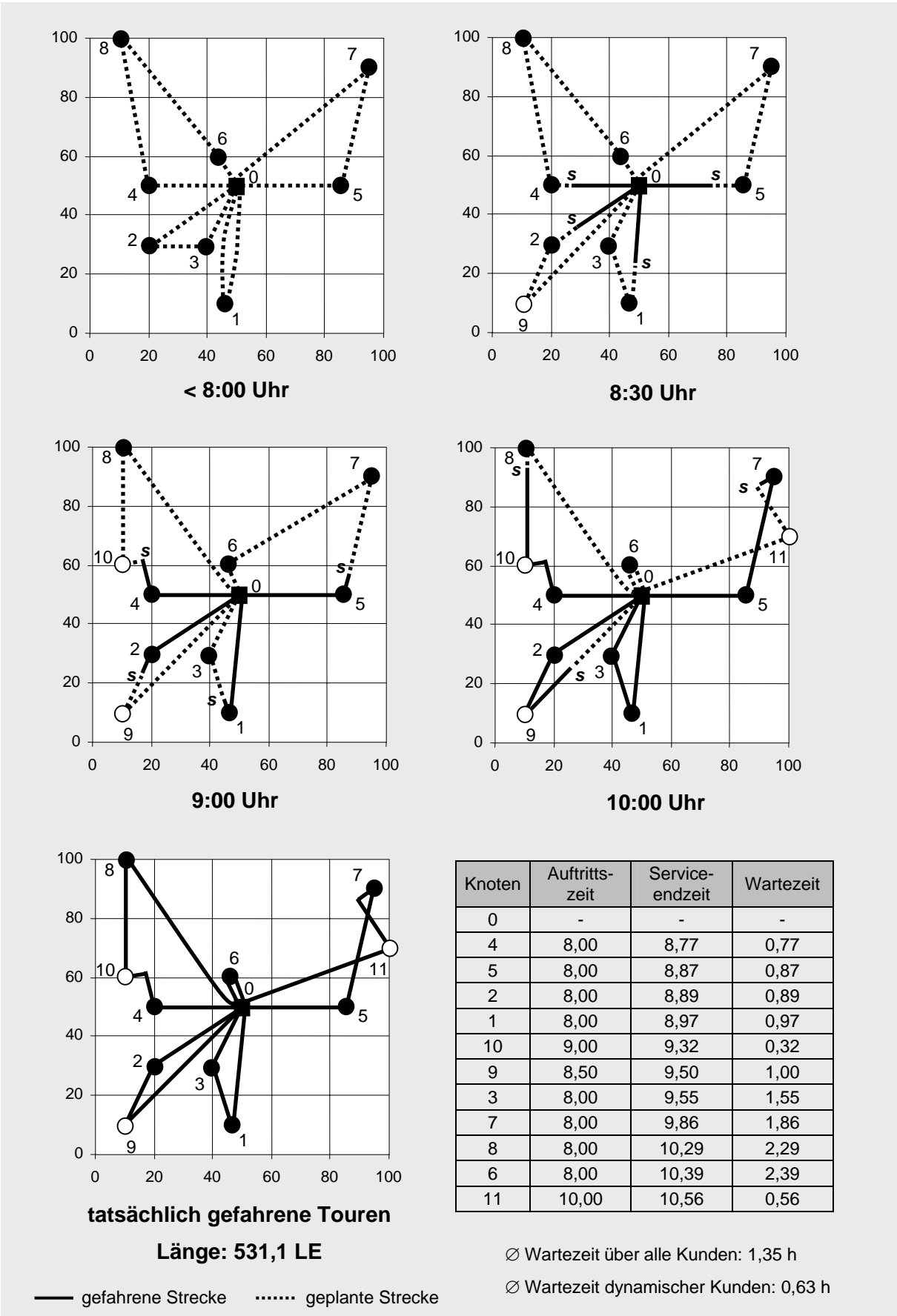


Abb. 4-21: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Tourenplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 4 Touren (0-1-0, 0-2-3-0, 0-4-8-6-0, 0-5-7-0)
8,00	Start der 4 Fahrzeuge am Depot (aktuelle Ziele: Fzg. 1 - Kunde 1, Fzg. 2 - Kunde 2, Fzg. 3 - Kunde 4, Fzg. 4 - Kunde 5)
8,50	<p>Kunde 9 tritt auf; folgende 4 Startknoten, die aus den 4 Positionen der 4 Fahrzeuge resultieren, ergeben sich:</p> <p>$s_{Fzg1}=(46,90;25,19)$, $s_{Fzg2}=(29,19;36,13)$, $s_{Fzg3}=(25,00;50,00)$, $s_{Fzg4}=(75,01;50,00)$; Datenbasis aktualisieren (neuen Kunden 9 aufnehmen) und Fahrzeugrestkapazitäten bestimmen (hier jeweils noch volle Kapazität, da noch keine Kunden bedient wurden); infolge der Tourenplanung werden 4 Touren generiert (s_{Fzg1}-1-3-0, s_{Fzg2}-2-9-0, s_{Fzg3}-4-8-6-0, s_{Fzg4}-5-7-0) → Iterationen des Savingsalgorithmus:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. s_{29} 0-2-9-0 2. s_{19} Kapazität reicht nicht 3. s_{57} 0-5-7-0 4. $s_{5s(Fzg4)}$ s_{Fzg4}-5-7-0 5. $s_{2s(Fzg2)}$ s_{Fzg2}-2-9-0 6. $s_{4s(Fzg3)}$ 0-4-s_{Fzg3} 7. $s_{1s(Fzg1)}$ 0-1-s_{Fzg1} 8. $s_{9s(Fzg2)}$ beide Knoten sind schon in einer Tour 9. s_{24} 2 kein Randknoten in seiner Tour; beide Touren besitzen schon einen Startknoten (nur 1 Startknoten je Tour erlaubt); Kapazität reicht nicht 10. s_{49} beide Touren besitzen schon einen Startknoten (nur 1 Startknoten je Tour erlaubt); Kapazität reicht nicht 11. s_{12} 2 kein Randknoten in seiner Tour; beide Touren besitzen schon einen Startknoten (nur 1 Startknoten je Tour erlaubt); Kapazität reicht nicht 12. s_{48} 0-8-4-s_{Fzg3} 13. s_{39} Kapazität reicht nicht 14. s_{13} 0-3-1-s_{Fzg1} 15. $s_{9s(Fzg1)}$ beide Touren besitzen schon einen Startknoten (nur 1 Startknoten je Tour erlaubt); Kapazität reicht nicht 16. $s_{7s(Fzg4)}$ beide Knoten sind schon in einer Tour ⋮ 35. s_{68} 0-6-8-4-s_{Fzg3} <p>Abbruch, da alle Kunden eingeplant und keine weiteren Kombinationen mehr möglich sind; die Knoten der Touren sind gegebenenfalls in umgekehrter Reihenfolge anzugeben, sodass die Startknoten immer am Anfang der Tour stehen keine Änderung von aktuellen Fahrzeugzielen</p>
8,77	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 3: Kunde 8)
8,87	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 4: Kunde 7)
8,89	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 2: Kunde 9)
8,97	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 1: Kunde 3)

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
9,00	Kunde 10 tritt auf; folgende 4 Startknoten, die aus den 4 Positionen der 4 Fahrzeuge resultieren, ergeben sich: $s_{Fzg1}=(44,67;11,32)$, $s_{Fzg2}=(17,49;24,98)$, $s_{Fzg3}=(17,71;61,44)$, $s_{Fzg4}=(86,62;56,47)$; Datenbasis aktualisieren (bereits bediente Kunden 4, 5, 2 und 1 entfernen und neuen Kunden 10 aufnehmen) und Fahrzeugrestkapazitäten bestimmen (Fzg1: 3 ME, Fzg2: 1 ME, Fzg3: 3 ME, Fzg4: 2 ME); infolge der Tourenplanung werden 4 Touren generiert ($s_{Fzg1}-3-0$, $s_{Fzg2}-9-0$, $s_{Fzg3}-10-8-0$, $s_{Fzg4}-7-6-0$) Änderung des aktuellen Zieles von Fahrzeug 3: Kunde 10
9,32	Kunde 10 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 3: Kunde 8)
9,50	Kunde 9 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 2: Depot)
9,55	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 1: Depot)
9,86	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 4: Kunde 6)
9,99	Fzg. 1 mit Tour 0-1-3-0 erreicht Depot
10,00	Kunde 11 tritt auf; folgende 3 Startknoten, die aus den 3 Positionen der 3 noch im Einsatz befindlichen Fahrzeuge resultieren, ergeben sich: $s_{Fzg2}=(27,62;27,62)$, $s_{Fzg3}=(10,00;93,82)$, $s_{Fzg4}=(88,91;86,34)$; Datenbasis aktualisieren (bediente Kunden 10, 9, 3 und 7 entfernen und neuen Kunden 11 aufnehmen) und Fahrzeugrestkapazitäten bestimmen (Fzg2: 0 ME, Fzg3: 2 ME, Fzg4: 1 ME); infolge der Tourenplanung werden 4 Touren generiert ($s_{Fzg2}-0$, $s_{Fzg3}-8-0$, $s_{Fzg4}-11-0$, $0-6-0$) Änderung des aktuellen Zieles von Fahrzeug 4: Kunde 11
10,29	Kunde 8 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 3: Depot)
10,39	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 5: Depot)
10,56	Kunde 11 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 4: Depot)
10,61	Fzg. 5 mit Tour 0-6-0 erreicht Depot
10,63	Fzg. 2 mit Tour 0-2-9-0 erreicht Depot
11,57	Fzg. 3 mit Tour 0-4-10-8-0 erreicht Depot
11,64	Fzg. 4 mit Tour 0-5-7-11-0 erreicht Depot

Tab. 4-10: Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) bei Änderung aktueller Zug erlaubt

Für dieses Beispiel ist die Tourlänge bei der zweiten Variante (*Änderung des aktuellen Zuges verboten*) um 16 %, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden um 20 % und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden um 121 % größer als bei der ersten Variante (*Änderung des aktuellen Zuges erlaubt*).

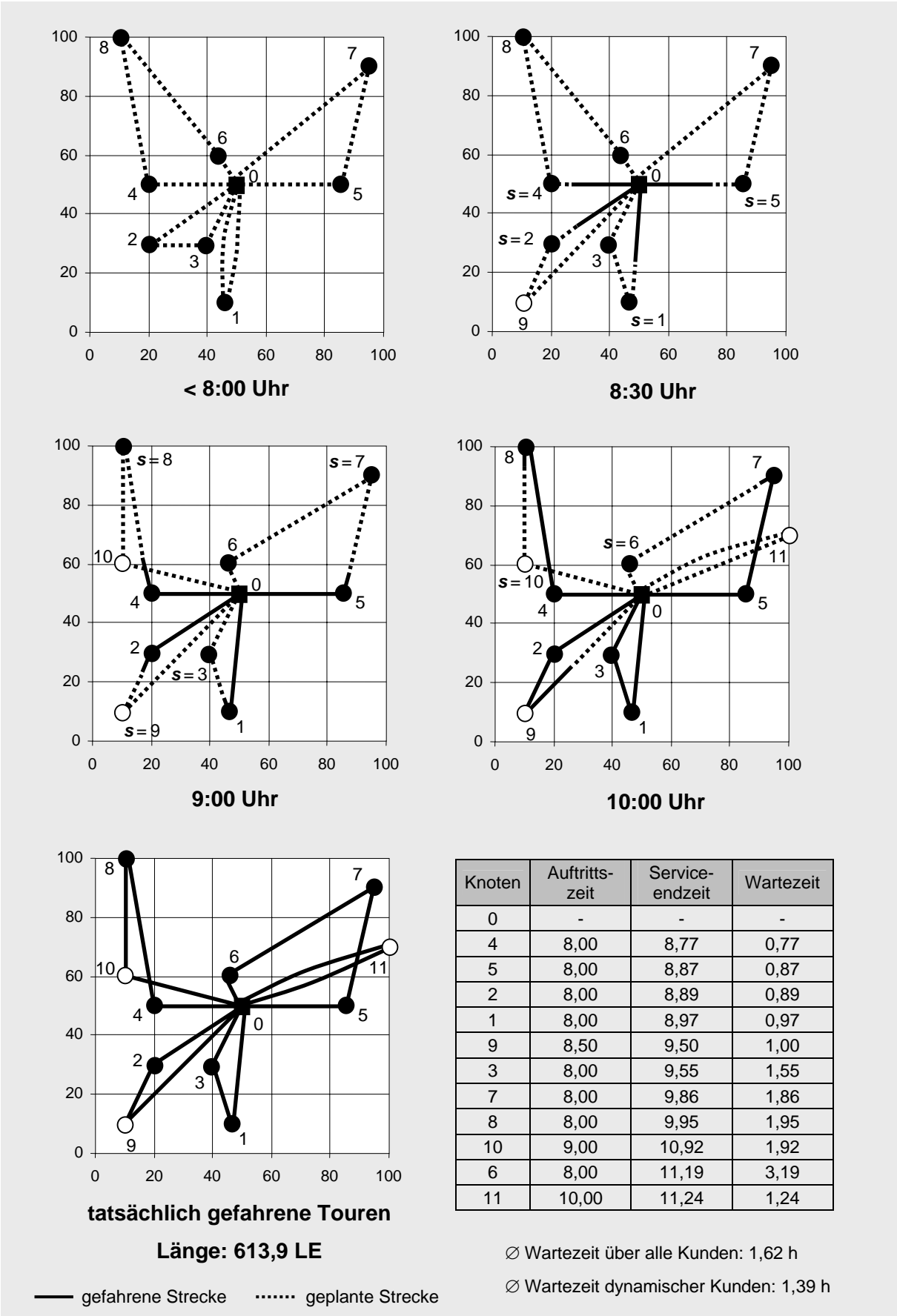


Abb. 4-22: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern

Zeitpunkt (in Stunden)	Ereignis
< 8,00	Tourenplanung für die statischen Kunden, Ergebnis: 4 Touren (0-1-0, 0-2-3-0, 0-4-8-6-0, 0-5-7-0)
8,00	Start der 4 Fahrzeuge am Depot (aktuelle Ziele: Fzg. 1 - Kunde 1, Fzg. 2 - Kunde 2, Fzg. 3 - Kunde 4, Fzg. 4 - Kunde 5)
8,50	Kunde 9 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(46,90;25,19)$, $s_{Fzg2}=(29,19;36,13)$, $s_{Fzg3}=(25,00;50,00)$, $s_{Fzg4}=(75,01;50,00)$; die aktuellen Fahrzeugziele bilden die Startknoten für die Planung: s_{Fzg1} =Knoten 1, s_{Fzg2} =Knoten 2, s_{Fzg3} =Knoten 4, s_{Fzg4} =Knoten 5; Datenbasis aktualisieren (neuen Kunden 9 aufnehmen) und Fahrzeugrestkapazitäten bestimmen (hier jeweils noch volle Kapazität, da noch keine Kunden bedient wurden); infolge der Tourenplanung werden 4 Touren generiert $(s_{Fzg1}(1)-3-0, s_{Fzg2}(2)-9-0, s_{Fzg3}(4)-8-6-0, s_{Fzg4}(5)-7-0)$
8,77	Kunde 4 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 3: Kunde 8)
8,87	Kunde 5 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 4: Kunde 7)
8,89	Kunde 2 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 2: Kunde 9)
8,97	Kunde 1 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 1: Kunde 3)
9,00	Kunde 10 tritt auf; 4 Startknoten: s_{Fzg1} =Knoten 3, s_{Fzg2} =Knoten 9, s_{Fzg3} =Knoten 8, s_{Fzg4} =Knoten 7; Datenbasis aktualisieren und Fahrzeugrestkapazitäten bestimmen (Fzg1: 3 ME, Fzg2: 1 ME, Fzg3: 3 ME, Fzg4: 2 ME); infolge der Tourenplanung werden 4 Touren generiert $(s_{Fzg1}(3)-0, s_{Fzg2}(9)-0, s_{Fzg3}(8)-10-0, s_{Fzg4}(7)-6-0)$
9,50	Kunde 9 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 2: Depot)
9,55	Kunde 3 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 1: Depot)
9,86	Kunde 7 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 4: Kunde 6)
9,95	Kunde 8 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 3: Kunde 10)
9,99	Fzg. 1 mit Tour 0-1-3-0 erreicht Depot
10,00	Kunde 11 tritt auf; 2 Startknoten: s_{Fzg3} =Knoten 10, s_{Fzg4} =Knoten 6 (s_{Fzg2} =Depot); Datenbasis aktualisieren und Fahrzeugrestkapazitäten bestimmen (Fzg2: 0 ME, Fzg3: 1 ME, Fzg4: 1 ME); infolge der Tourenplanung werden 4 Touren generiert $(s_{Fzg2}(0)-0, s_{Fzg3}(10)-0, s_{Fzg4}(6)-0, 0-11-0)$
10,63	Fzg. 2 mit Tour 0-2-9-0 erreicht Depot
10,91	Kunde 10 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 3: Depot)
11,19	Kunde 6 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 4: Depot)
11,24	Kunde 11 erreicht (neues aktuelles Ziel für Fzg. 5: Depot)
11,41	Fzg. 4 mit Tour 0-5-7-6-0 erreicht Depot
11,74	Fzg. 3 mit Tour 0-4-8-10-0 erreicht Depot
12,32	Fzg. 5 mit Tour 0-11-0 erreicht Depot

Tab. 4-11: Ablauf des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) bei Änderung aktueller Zug verboten

Anhang A5 enthält ein weiteres Beispiel, das die Anwendung des modifizierten Savings-Verfahrens für die dynamische Tourenplanung demonstriert. Das Beispiel umfasst 25 Kunden.

Ein weiterer Analysekomplex ist die Bestimmung der Savingswerte. Bei der dynamischen Tourenplanung muss berücksichtigt werden, ob das modifizierte Savingsverfahren momentan für den 1. Planungslauf, d. h. die Planung für die statischen Kunden, oder zur Lösung eines der Teilprobleme eingesetzt wird. Für den ersten Planungslauf kann die klassische Formel zur Berechnung der Savingswerte beibehalten werden. Sie beinhaltet, dass ein Savingswert dann einen hohen Wert annimmt, wenn die Kunden weit weg vom Depot liegen und selbst eine geringe Entfernung zueinander haben. Die Formel $s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$ drückt diesen erwünschten Sachverhalt aus.

Zur Lösung der Teilprobleme im dynamischen Tourenplanungsprozess können folgende Überlegungen in eine veränderte Formel zur Bestimmung der Savingswerte eingehen:⁴⁰⁶

Ein geringer Abstand zwischen einem Startknoten und einem Kunden j sollte sich positiv auswirken, da dann ein Fahrzeug in unmittelbarer Nähe des Kunden j ist. Dieses Fahrzeug, das durch den betreffenden Startknoten symbolisiert wird, sollte die Bedienung des Kunden j übernehmen. Infolgedessen ist der Parameter c_{0i} , wenn i den Startknoten repräsentiert, nicht zwingend erforderlich. Es kann die Formel $s_{ij} = c_{0j} - c_{ij}$, mit i = Startknoten und j beliebiger Kunde, verwendet werden.

⁴⁰⁶ In dieser Arbeit wurde noch die klassische Savingsformel verwendet.

4.3.3 Modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung

In diesem Kapitel werden vier Möglichkeiten der Modifikation des Verfahrens Sukzessive Einbeziehung für die dynamische Tourenplanung vorgestellt.⁴⁰⁷ Neben der Vorstellung der vier Varianten soll ein Vergleich des Verfahrens Sukzessive Einbeziehung mit dem hier in der Arbeit vorgestellten modifizierten Savingsverfahren für die dynamische Tourenplanung erfolgen.

Bereits LUND et al. übertrugen das Verfahren Sukzessive Einbeziehung auf die dynamische Tourenplanung.⁴⁰⁸ Diese Modifikationen umfassen die Berücksichtigung der aktuellen Fahrzeugpositionen und Fahrzeugrestkapazitäten, die bei der Integration der auftretenden dynamischen Kunden in den Tourenplan zu beachten sind. Des Weiteren integrieren LUND et al. die Problemstellung von Kundenzeitfenstern in ihr Verfahren, die in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt wird.

Bei LUND et al. erfolgt die Beschreibung der Kernidee zur Modifikation des Verfahrens Sukzessive Einbeziehung und die Präsentation von Simulationsergebnissen, jedoch sind eine exakte Beschreibung des Verfahrens oder ein Rechenbeispiel nicht enthalten. Innerhalb der Kernidee formulieren LUND et al., dass der erste in eine Tour einzubeziehende Kunde möglichst weit entfernt zum Depot und möglichst nah zur aktuellen Fahrzeugposition sein soll.⁴⁰⁹ Dabei erfolgt eine Gewichtung von zwei zu eins. Wie diese Idee innerhalb des Verfahrens respektive in einer Formel umzusetzen ist, bleibt offen.⁴¹⁰ Ferner wird nicht erklärt, ob dieses Vorgehen bereits auf den aktuell anvisierten Kunden oder auf den danach folgenden ersten in die Tour einzuplanenden Kunden anzuwenden ist.

Die Kernidee von LUND et al. wird hier aufgegriffen. Da eine exakte Reproduzierung des Verfahrens nach LUND et al., wie beschrieben, nicht möglich ist, wird versucht, das Verfahren von LUND et al. in einer denkbaren Variante nachzuempfinden. Hierbei erfolgt die Umsetzung der Idee, dass der erste in eine Tour einzubeziehende Kunde möglichst weit entfernt zum Depot und möglichst nah zur aktuellen Fahrzeugposition sein soll, in folgender Formel:

⁴⁰⁷ Vgl. zum Verfahren Sukzessive Einbeziehung für statische Tourenplanungsprobleme Kapitel 2.7.3.

⁴⁰⁸ Vgl. Lund et al. (1996), S. 8 f. und Kapitel 3.4.2.

⁴⁰⁹ Vgl. Lund et al. (1996), S. 9.

⁴¹⁰ Von einer Nachprogrammierung des Verfahrens von LUND et al. zu Vergleichszwecken musste abgesehen werden, da die Verfahrensbeschreibung bei LUND et al. zu unpräzise ist. Ferner war eine Verwendung der Simulationsergebnisse von LUND et al. zu Vergleichszwecken aufgrund von enthaltenen Zufallskomponenten (Vgl. hierzu Lund et al. (1996), S. 7 f.) und der Berücksichtigung von Kundenzeitfenstern ebenfalls nicht möglich.

$$x_i = (2 \cdot \text{Entfernung Kunde } i \text{ zum Depot}) - (1 \cdot \text{Entfernung Kunde } i \text{ zur aktuellen Fahrzeugposition } s_{Fzg})^{411}$$

⇒ Der Kunde mit dem größten x_i wird ausgewählt.

Dieses Vorgehen wird im Folgenden als Variante 1 bezeichnet. Um die Notwendigkeit der in Variante 1 herangezogenen Formel für die Einbeziehung des ersten in eine Tour zu integrierenden Kunden zu überprüfen, wird bei der zweiten hier vorgestellten Variante eines Verfahrens Sukzessive Einbeziehung für die dynamische Tourenplanung auf diese Formel verzichtet. Die Varianten 1 und 2 besitzen nicht die Möglichkeit den aktuellen Fahrzeugzug zu ändern. Daher stellt Variante 3 die Erweiterung von Variante 1 um die Möglichkeit der Änderung des aktuellen Zuges dar. Gleiches gilt für Variante 4 in Bezug auf Variante 2. Im Folgenden wird kurz die Vorgehensweise der vier Varianten zusammengefasst.

Die Planung für die statischen Kunden (erste Planung) ist bei allen Varianten gleich:

Die Touren werden sequentiell gebildet. Die Initialisierung jeder Tour erfolgt durch den am weitesten vom Depot entfernten noch unverplanten Knoten (Kunden). Für jeden noch nicht in den Tourenplan aufgenommenen Kunden (Knoten k) wird die beste Einfügeposition ($c_{ik} + c_{jk} - c_{ij}$, i und j seien zwei benachbarte Knoten (Kunden) innerhalb der im Aufbau befindlichen Tour) unter allen möglichen Einfügepositionen bezüglich der aktuell betrachteten Tour bestimmt. Nacheinander erfolgt so die Aufnahme der Kunden in die Tour anhand der minimalen Einfügekosten, bis die Kapazität einer Tour erschöpft ist. Danach wird die nächste Tour gebildet.

Planung bei Auftritt eines dynamischen Kunden:

In Anlehnung an LUND et al. werden die Touren bei jeder Variante von Grund auf neu geplant.⁴¹²

1. Variante (vgl. Abb. 4-24): Es findet keine Änderung des aktuellen Zuges statt. Jede Tour wird initialisiert, indem die Bildung einer Kurzkette von einer aktuellen Fahrzeugposition (Startknoten) zum Depot erfolgt, d. h. die Kurzkette: aktuelle Fahrzeugposition - anvisierter Kunde (Knoten) - Depot.⁴¹³ Für den nun als erstes einzufügenden Kunden einer jeden zu bildenden Tour wird in Anlehnung an LUND et al. die zuvor beschriebene besondere Formel verwendet: Füge den Kunden ein, der sich weit weg vom Depot aber nah zur aktuellen Fahrzeugposition befindet, wobei Gewichte im Verhältnis zwei zu eins zu beach-

⁴¹¹ Die Entfernung eines zu integrierenden Kunden i zur aktuellen Fahrzeugposition bezieht sich auf den aktuell anvisierten Kunden, da das Teilstück zwischen aktueller Fahrzeugposition und anvisiertem Kunden bei LUND et al. fix ist.

⁴¹² Diese Vorgehensweise wird, wie in Kapitel 4.1 erklärt, als globales Verfahren bezeichnet. Vgl. auch Lund et al. (1996), S. 8 f.

⁴¹³ Es gilt zu beachten, dass das Teilstück von der aktuellen Fahrzeugposition zum momentan anvisierten Kunden (Knoten) fix ist, da die Änderung des aktuellen Zuges nicht durchgeführt werden darf. Vgl. dazu auch das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung für das DTSP in Kapitel 4.2.3.

ten sind. Alle weiteren Kunden, zu denen auch die bis zum aktuellen Zeitpunkt bekannt gewordenen dynamischen Kunden zählen, werden nach den geringsten Einfügekosten in die Tour integriert, bis die Kapazität der Tour erschöpft ist. Bereits bediente Kunden spielen bei der aktuellen Planung keine Rolle mehr. Allerdings muss, wie bei dem anderen zur dynamischen Tourenplanung bereits vorgestellten Verfahren, die Restkapazität der Fahrzeuge beachtet werden.

2. Variante (vgl. Abb. 4-25): Es findet ebenfalls keine Änderung des aktuellen Zuges statt. Erneut erfolgt die Initialisierung jeder Tour durch die Kurzkette: aktuelle Fahrzeugposition - anvisierter Kunde (Knoten) - Depot. Im Gegensatz zu Variante 1 findet hier die von LUND et al. abgeleitete Formel für die Einfügung des ersten Kunden einer jeden Kurzkette keine Anwendung. Alle Kunden, einschließlich der dynamischen Kunden, werden ausschließlich nach den geringsten Einfügekosten in die Tour integriert, bis die Kapazität der Tour erschöpft ist.

3. Variante (vgl. Abb. 4-26): Diese Variante stellt die Erweiterung von Variante 1, um die Möglichkeit den aktuellen Fahrzeugzug zu ändern, dar. Dabei verläuft die zur Initialisierung einer jeden Tour notwendige Kurzkette direkt von der aktuellen Fahrzeugposition zum Depot.

4. Variante (vgl. Abb. 4-27): Diese Variante gleicht Variante 2, differiert allerdings auch wieder darin, dass die Änderung des aktuellen Zuges erlaubt ist und dass die zur Initialisierung einer jeden Tour notwendige Kurzkette direkt von der aktuellen Fahrzeugposition zum Depot verläuft.

Die folgenden Beispieldaten (vgl. Abb. 4-23), anhand derer alle vier Varianten vorstellt werden, sind identisch mit denen zum modifizierten Savingsverfahren (DVRP) aus Kapitel 4.3.2: Das Kundengebiet hat wieder eine Ausdehnung von 100 LE x 100 LE, wobei eine LE einem Kilometer entspricht. Zur Bestimmung der Entfernung wird erneut die Koordinatenmethode verwendet. Die Kunden 1 bis 8 sind statisch und die Kunden 9 bis 11 dynamisch. Kunde 9 tritt 8:30 Uhr, Kunde 10 9:00 Uhr und Kunde 11 10:00 Uhr auf. Die Fahrzeuge starten 8:00 Uhr am Depot und fahren mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h. Die maximale Kapazität je Fahrzeug beträgt 5 ME. Bei jedem Kunden hat ein Fahrzeug eine vom Kundenbedarf unabhängige Standzeit von 10 Minuten. Für die Bestimmung der Wartezeiten wird als Auftrittszeit für die statischen Kunden wieder 8:00 Uhr angenommen, was dem Startzeitpunkt der Fahrzeuge am Depot entspricht.

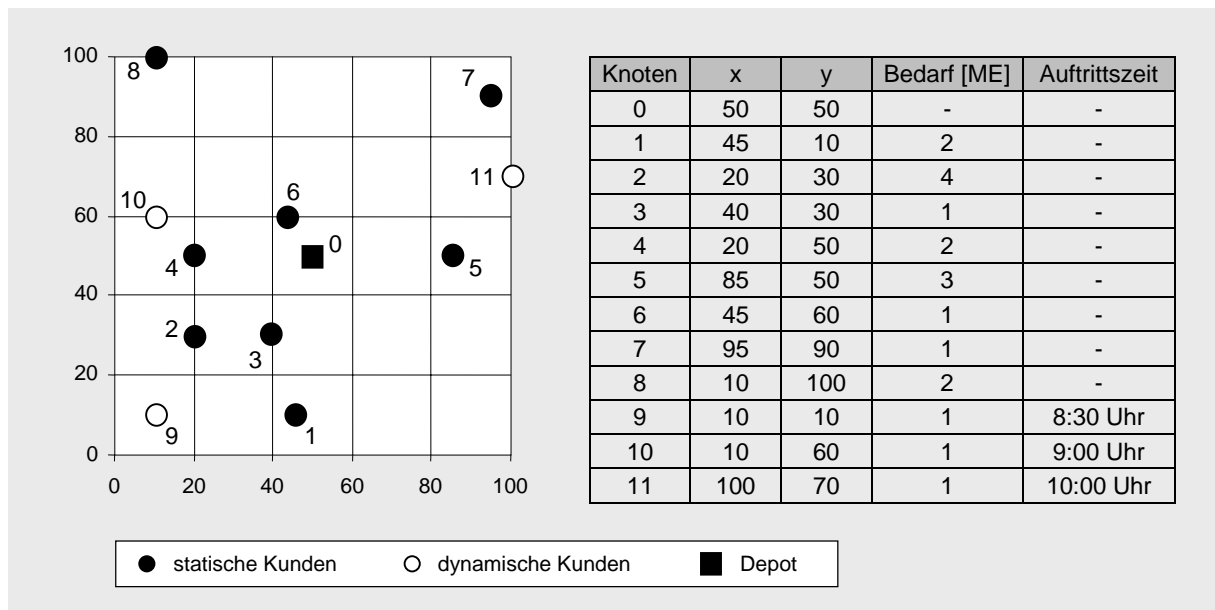


Abb. 4-23: Verteilung und Auftrittszeitpunkte der Kunden für das Beispiel zum modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP)

Die Abbildungen 4-24 bis 4-27 und die Tabellen 4-12 bis 4-15 enthalten die Ergebnisse zu den vier beschriebenen Varianten. Bei allen vier Varianten des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) zeigt sich, dass die Ergebnisse für dieses Beispiel schlechter bzw. sogar deutlich schlechter als die Ergebnisse zum modifizierten Savingsverfahren (DVRP) sind:

Modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP):

Variante 1: 630,3 LE

(Keine Änderung aktueller Zug; extra Formel für ersten einzufügenden Kunden einer Tour)

Variante 2: 660,2 LE

(Keine Änderung aktueller Zug; ohne besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden einer Tour)

Variante 3: 771,2 LE

(Änderung aktueller Zug möglich; extra Formel für ersten einzufügenden Kunden einer Tour)

Variante 4: 661,6 LE

(Änderung aktueller Zug möglich; ohne besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden einer Tour)

Modifiziertes Savingsverfahren (DVRP):

Variante Änderung aktueller Zug möglich: 531,1 LE

Variante Keine Änderung aktueller Zug: 613,9 LE

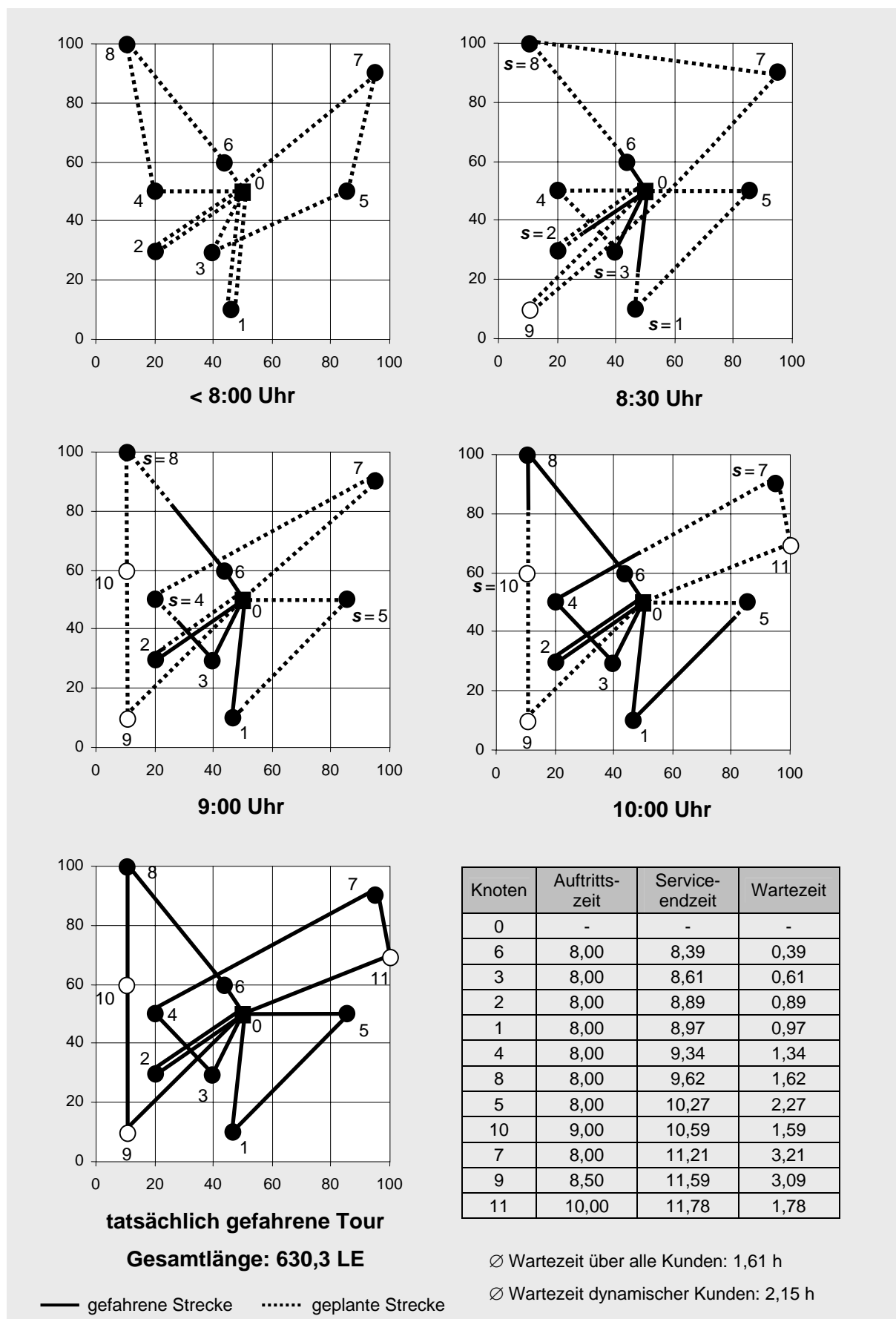


Abb. 4-24: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

Zeitpunkt (in Stunden)	Planung
< 8,00	<p>Tourenplanung für die statischen Kunden:</p> <p>T1: weitester Kunde: 8 0-8-0 Kap=2 0-6-8-0 Kap=3 0-6-8-4-0 Kap=5</p> <p>T2: weitester Kunde: 7 0-7-0 Kap=1 0-5-7-0 Kap=4 0-3-5-7-0 Kap=5</p> <p>T3: weitester Kunde: 1 0-1-0 Kap=2</p> <p>T4: weitester Kunde: 2 0-2-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren (0-6-8-4-0, 0-3-5-7-0, 0-1-0, 0-2-0)</p>
8,50	<p>Kunde 9 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(41,39;64,13)$, $s_{Fzg2}=(40,00;30,00)$, $s_{Fzg3}=(46,90;25,19)$, $s_{Fzg4}=(29,20;36,13)$; Tourenplanung:</p> <p>T1: $s_1(8)$-0 Kap=3 $s_1(8)$-7-0 Kap=4 $s_1(8)$-7-9-0 Kap=5</p> <p>T2: $s_2(3)$-0 Kap=1 $s_2(3)$-4-0 Kap=3</p> <p>T3: $s_3(1)$-0 Kap=2 $s_3(1)$-5-0 Kap=5</p> <p>T4: $s_4(2)$-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1(8)$-7-9-0, $s_2(3)$-4-0, $s_3(1)$-5-0, $s_4(2)$-0)</p>
9,00	<p>Kunde 10 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(24,92;82,94)$, $s_{Fzg2}=(26,35;43,65)$, $s_{Fzg3}=(46,06;11,06)$, $s_{Fzg4}=(24,67;33,11)$; Tourenplanung:</p> <p>T1: $s_1(8)$-0 Kap=3 $s_1(8)$-10-0 Kap=4 $s_1(8)$-10-9-0 Kap=5</p> <p>T2: $s_2(4)$-0 Kap=3 $s_2(4)$-7-0 Kap=4</p> <p>T3: $s_3(5)$-0 Kap=5</p> <p>T4: s_4-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1(8)$-10-9-0, $s_2(4)$-7-0, $s_3(5)$-0, s_4-0)</p>
10,00	<p>Kunde 11 tritt auf; 3 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(10,00;81,00)$, $s_{Fzg2}=(49,12;65,53)$, $s_{Fzg3}=(81,42;46,42)$; Tourenplanung:</p> <p>T1: $s_1(10)$-0 Kap=4 $s_1(10)$-9-0 Kap=5</p> <p>T2: $s_2(7)$-0 Kap=4 $s_2(7)$-11-0 Kap=5</p> <p>T3: $s_3(5)$-0 Kap=5</p> <p>T4: bereits beendet</p> <p>Ergebnis: 3 Touren ($s_1(10)$-9-0, $s_2(7)$-11-0, $s_3(5)$-0)</p>

Tab. 4-12: Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

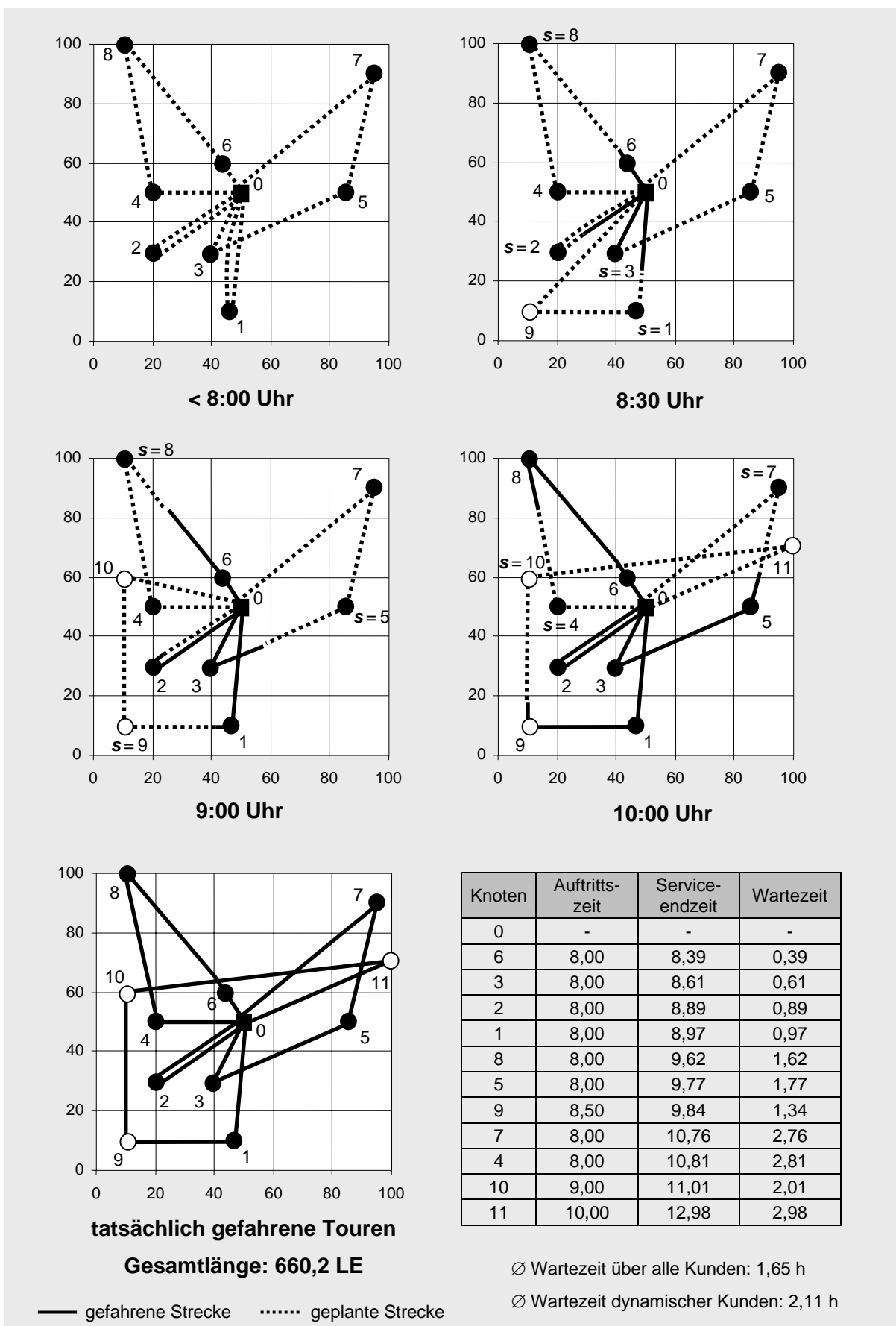


Abb. 4-25: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung der modifizierten Sukzessiven Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

Zeitpunkt (in Stunden)	Planung
< 8,00	<p>Tourenplanung für die statischen Kunden:</p> <p>T1: weitester Kunde: 8 0-8-0 Kap=2 0-6-8-0 Kap=3 0-6-8-4-0 Kap=5</p> <p>T2: weitester Kunde: 7 0-7-0 Kap=1 0-5-7-0 Kap=4 0-3-5-7-0 Kap=5</p> <p>T3: weitester Kunde: 1 0-1-0 Kap=2</p> <p>T4: weitester Kunde: 2 0-2-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren (0-6-8-4-0, 0-3-5-7-0, 0-1-0, 0-2-0)</p>
8,50	<p>Kunde 9 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(41,39;64,13)$, $s_{Fzg2}=(40,00;30,00)$, $s_{Fzg3}=(46,90;25,19)$, $s_{Fzg4}=(29,20;36,13)$; Tourenplanung:</p> <p>T1: $s_1(8)$-0 Kap=3 $s_1(8)$-4-0 Kap=5</p> <p>T2: $s_2(3)$-0 Kap=1 $s_2(3)$-5-7-0 Kap=4 $s_2(3)$-5-7-0 Kap=5</p> <p>T3: $s_3(1)$-0 Kap=2 $s_3(1)$-9-0 Kap=3</p> <p>T4: $s_4(2)$-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1(8)$-4-0, $s_2(3)$-5-7-0, $s_3(1)$-9-0, $s_4(2)$-0)</p>
9,00	<p>Kunde 10 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(24,92;82,94)$, $s_{Fzg2}=(57,64;37,84)$, $s_{Fzg3}=(43,65;10,00)$, $s_{Fzg4}=(24,67;33,11)$; Tourenplanung:</p> <p>T1: $s_1(8)$-0 Kap=3 $s_1(8)$-4-0 Kap=5</p> <p>T2: $s_2(5)$-0 Kap=4 $s_2(5)$-7-0 Kap=5</p> <p>T3: $s_3(9)$-0 Kap=3 $s_3(9)$-10-0 Kap=4</p> <p>T4: s_4-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1(8)$-4-0, $s_2(5)$-7-0, $s_3(9)$-10-0, s_4-0)</p>
10,00	<p>Kunde 11 tritt auf; 3 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(13,73;81,37)$, $s_{Fzg2}=(87,84;61,38)$, $s_{Fzg3}=(10,00;18,02)$; Tourenplanung:</p> <p>T1: $s_1(4)$-0 Kap=5</p> <p>T2: $s_2(7)$-0 Kap=5</p> <p>T3: $s_3(10)$-0 Kap=4 $s_3(10)$-11-0 Kap=5</p> <p>T4: bereits beendet</p> <p>Ergebnis: 3 Touren ($s_1(4)$-0, $s_2(7)$-0, $s_3(10)$-11-0)</p>

Tab. 4-13: Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) ohne Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

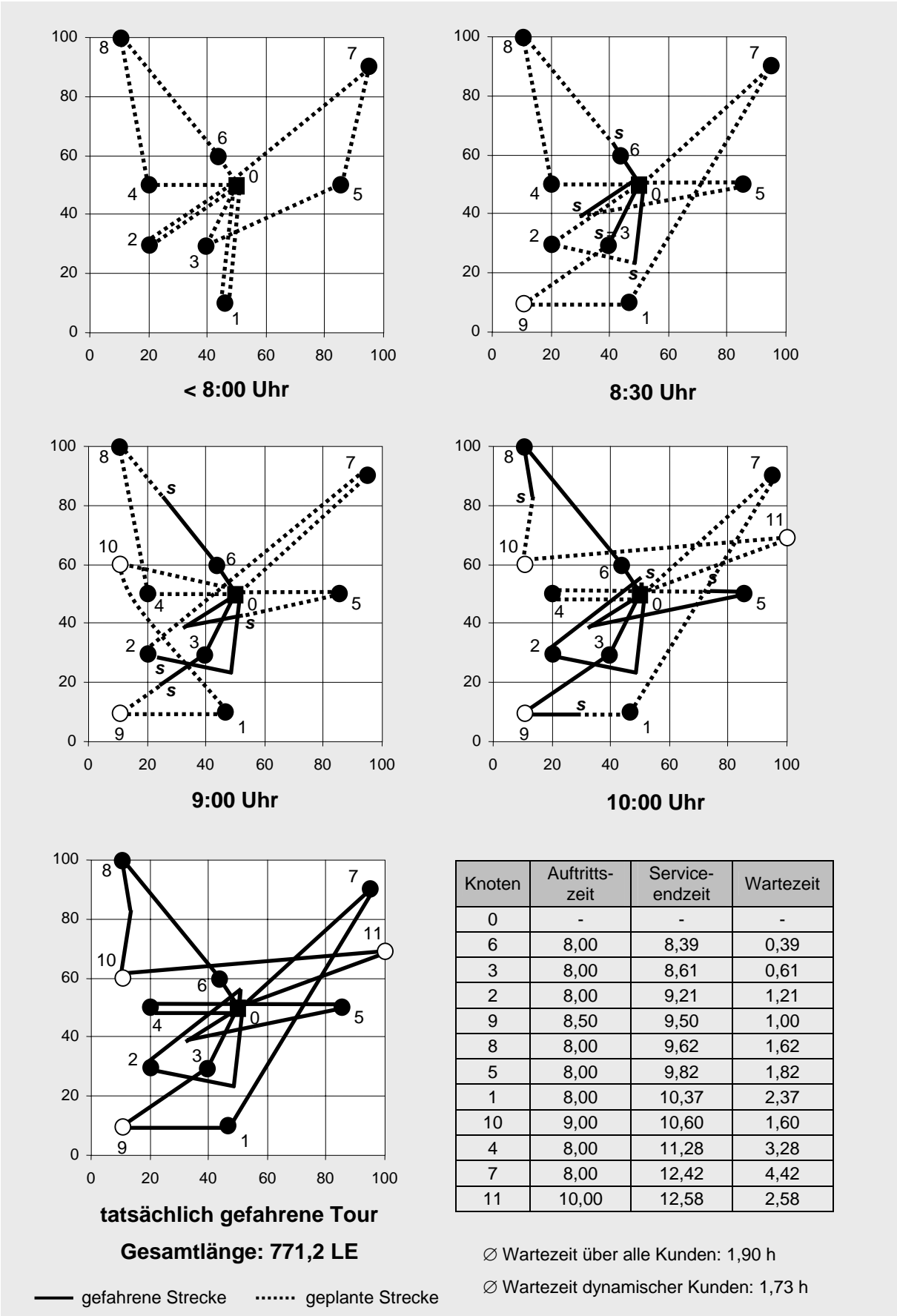


Abb. 4-26: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

Zeitpunkt (in Stunden)	Planung
< 8,00	<p>Tourenplanung für die statischen Kunden:</p> <p>T1: weitester Kunde: 8 0-8-0 Kap=2 0-6-8-0 Kap=3 0-6-8-4-0 Kap=5</p> <p>T2: weitester Kunde: 7 0-7-0 Kap=1 0-5-7-0 Kap=4 0-3-5-7-0 Kap=5</p> <p>T3: weitester Kunde: 1 0-1-0 Kap=2</p> <p>T4: weitester Kunde: 2 0-2-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren (0-6-8-4-0, 0-3-5-7-0, 0-1-0, 0-2-0)</p>
8,50	<p>Kunde 9 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(41,39;64,13)$, $s_{Fzg2}=(40,00;30,00)$, $s_{Fzg3}=(46,90;25,19)$, $s_{Fzg4}=(29,20;36,13)$;</p> <p>Tourenplanung:</p> <p>T1: s_1-0 Kap=1 s_1-8-0 Kap=3 $s_1-8-4-0$ Kap=5</p> <p>T2: s_2-0 Kap=1 s_2-9-0 Kap=2 $s_2-9-1-0$ Kap=4 $s_2-9-1-7-0$ Kap=5</p> <p>T3: s_3-0 Kap=0 s_3-2-0 Kap=4</p> <p>T4: s_4-0 Kap=0 s_4-5-0 Kap=3</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1-8-4-0$, $s_2-9-1-7-0$, s_3-2-0, s_4-5-0)</p>
9,00	<p>Kunde 10 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(24,92;82,94)$, $s_{Fzg2}=(23,94;19,29)$, $s_{Fzg3}=(22,29;29,59)$, $s_{Fzg4}=(53,46;42,16)$;</p> <p>Tourenplanung:</p> <p>T1: s_1-0 Kap=1 s_1-8-0 Kap=3 $s_1-8-4-0$ Kap=5</p> <p>T2: s_2-0 Kap=1 s_2-9-0 Kap=2 $s_2-9-1-0$ Kap=4 $s_2-9-1-10-0$ Kap=5</p> <p>T3: s_3-0 Kap=0 s_3-2-0 Kap=4 $s_3-2-7-0$ Kap=5</p> <p>T4: s_4-0 Kap=0 s_4-5-0 Kap=3</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1-8-4-0$, $s_2-9-1-10-0$, $s_3-2-7-0$, s_4-5-0)</p>
10,00	<p>Kunde 11 tritt auf; 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(13,73;81,37)$, $s_{Fzg2}=(34,92;10,00)$, $s_{Fzg3}=(50,72;54,58)$, $s_{Fzg4}=(75,83;50,00)$</p> <p>Tourenplanung:</p> <p>T1: s_1-0 Kap=3 s_1-10-0 Kap=4 $s_1-10-11-0$ Kap=5</p> <p>T2: s_2-0 Kap=2 s_2-1-0 Kap=4 $s_2-1-7-0$ Kap=5</p> <p>T3: s_3-0 Kap=4</p> <p>T4: s_4-0 Kap=3 s_4-4-0 Kap=5</p> <p>Ergebnis: 4 Touren ($s_1-10-11-0$, $s_2-1-7-0$, s_3-0, s_4-4-0)</p>

Tab. 4-14: Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; extra Formel für den ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

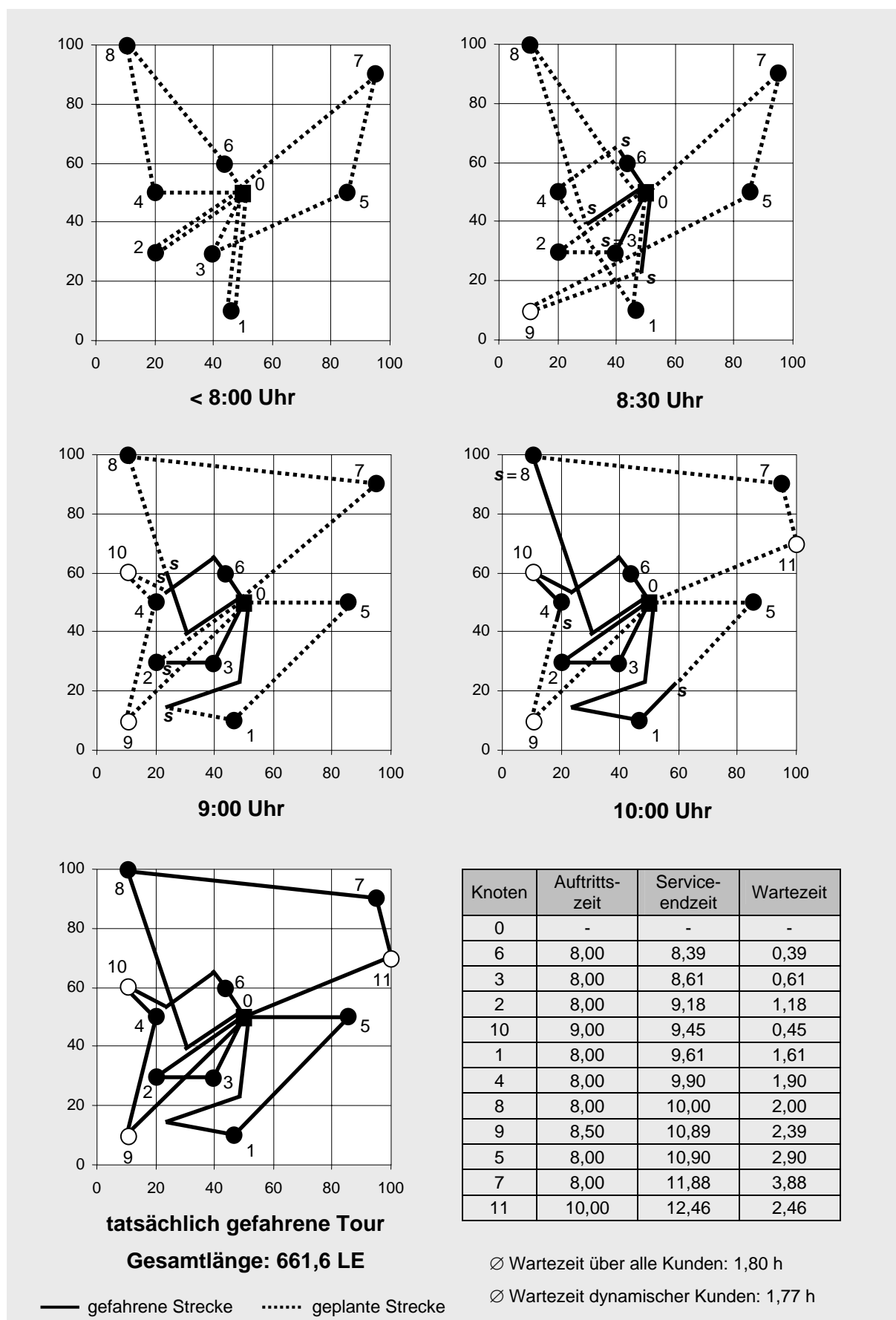


Abb. 4-27: Geplante Touren und tatsächlich gefahrene Strecke bei Anwendung des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

Zeitpunkt (in Stunden)	Planung
< 8,00	<p>Tourenplanung für die statischen Kunden:</p> <p>T1: weitester Kunde: 8 0-8-0 Kap=2 0-6-8-0 Kap=3 0-6-8-4-0 Kap=5</p> <p>T2: weitester Kunde: 7 0-7-0 Kap=1 0-5-7-0 Kap=4 0-3-5-7-0 Kap=5</p> <p>T3: weitester Kunde: 1 0-1-0 Kap=2</p> <p>T4: weitester Kunde: 2 0-2-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 4 Touren (0-6-8-4-0, 0-3-5-7-0, 0-1-0, 0-2-0)</p>
8,50	<p>Kunde 9 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(41,39;64,13)$, $s_{Fzg2}=(40,00;30,00)$, $s_{Fzg3}=(46,90;25,19)$, $s_{Fzg4}=(29,20;36,13)$;</p> <p>Tourenplanung:</p> <p>T1: s_1-0 Kap=1 s_1-4-0 Kap=3 s_1-4-1-0 Kap=5</p> <p>T2: s_2-0 Kap=1 s_2-2-0 Kap=5</p> <p>T3: s_3-0 Kap=0 s_3-5-0 Kap=3 s_3-5-7-0 Kap=4 s_3-9-5-7-0 Kap=5</p> <p>T4: s_4-0 Kap=0 s_4-8-0 Kap=2</p> <p>Ergebnis: 4 Touren (s_1-4-1-0, s_2-2-0, s_3-9-5-7-0, s_4-8-0)</p>
9,00	<p>Kunde 10 tritt auf; die 4 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(20,53;50,35)$, $s_{Fzg2}=(20,69;30,00)$, $s_{Fzg3}=(23,78;15,67)$, $s_{Fzg4}=(22,00;60,07)$;</p> <p>Tourenplanung:</p> <p>T1: s_1-0 Kap=1 s_1-4-0 Kap=3 s_1-10-4-0 Kap=4 s_1-10-4-9-0 Kap=5</p> <p>T2: s_2-0 Kap=1 s_2-2-0 Kap=5</p> <p>T3: s_3-0 Kap=0 s_3-1-0 Kap=2 s_3-1-5-0 Kap=5</p> <p>T4: s_4-0 Kap=0 s_4-8-0 Kap=2 s_4-8-7-0 Kap=3</p> <p>Ergebnis: 4 Touren (s_1-10-4-9-0, s_2-2-0, s_3-1-5-0, s_4-8-7-0)</p>
10,00	<p>Kunde 11 tritt auf; 3 Fahrzeuge haben momentan folgende Standorte: $s_{Fzg1}=(18,81;45,24)$, $s_{Fzg3}=(58,93;23,93)$, $s_{Fzg4}=(10,00;100,00)$;</p> <p>Tourenplanung:</p> <p>T1: s_1-0 Kap=4 s_1-9-0 Kap=5</p> <p>T2: bereits beendet</p> <p>T3: s_3-0 Kap=2 s_3-5-0 Kap=5</p> <p>T4: s_4-0 Kap=2 s_4-7-0 Kap=3 s_4-7-11-0 Kap=4</p> <p>Ergebnis: 3 Touren (s_1-9-0, s_3-5-0, s_4-7-11-0)</p>

Tab. 4-15: Planungen beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DVRP) mit Möglichkeit den aktuellen Zug zu ändern; keine besondere Formel für ersten einzufügenden Kunden jeder Tour

4.4 Zielkonflikt zwischen Minimierung der Tourlänge und der Wartezeit

Bei allen präsentierten Beispielen zu den Verfahren erfolgte die Berechnung der Wartezeit neben der Bestimmung der Tourlänge. Nach PSARAFTIS stellt die Wartezeit der Kunden (bzw. die Lieferzeit) ein wichtiges Zielkriterium bei der dynamischen Tourenplanung dar.⁴¹⁴ Daher erfolgte bei den bis jetzt vorgestellten Beispielen die Angabe der Wartezeit neben der Tourlänge als zusätzliche Information. Zu beachten ist allerdings, dass zwischen der Wartezeit und der Tourlänge ein Zielkonflikt vorliegen kann, wie folgendes einfaches Beispiel zeigen soll. Das Beispiel demonstriert, dass nicht zwingend die Tour bzw. Rundreise mit der geringsten Länge auch die geringste kumulierte Wartezeit respektive durchschnittliche Wartezeit besitzt.

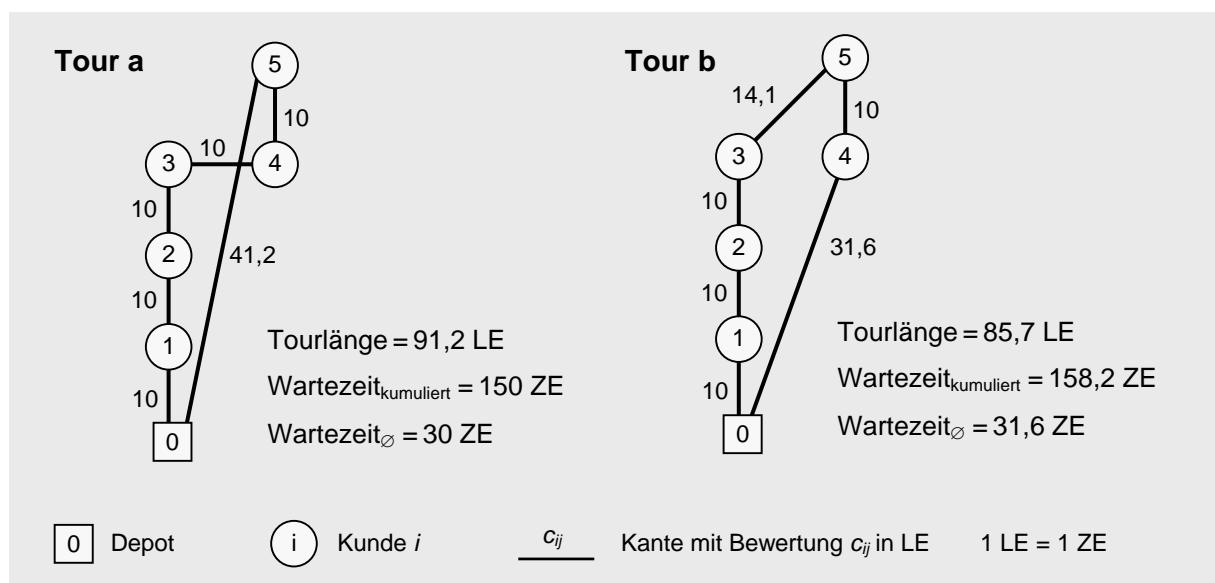


Abb. 4-28: Zielkonflikt zwischen Minimierung der Tourlänge und Minimierung der Wartezeit

Die Bestimmung der kumulierten Wartezeit und der durchschnittlichen Wartezeit erfolgt anhand der Formeln 4.7 und 4.8 (siehe Kapitel 4.2.2, S. 146). Wie in Abbildung 4-28 zu sehen ist, weist Tour a eine größere Tourlänge auf, hat dafür aber eine geringere kumulierte Wartezeit und darausfolgend auch eine kürzere durchschnittliche Wartezeit. Entgegengesetzt verhält es sich bei Tour b. Hier ist die Tourlänge geringer als bei Tour a, aber dafür steigt die Wartezeit an. Dieses Beispiel zeigt, dass nicht automatisch das Verfahren, das die Tour mit der geringsten Länge erzeugt, auch im Sinne einer kurzen Wartezeit am besten sein muss. Infolgedessen kann beispielsweise das Verfahren Bester Nachfolger durchaus eine Tour konstruieren, die im Durchschnitt geringe Wartezeiten für die Kunden aufweist,

⁴¹⁴ Vgl. Psaraftis, H. (1995), S. 160.

obwohl dieser Algorithmus tendenziell schlechtere Ergebnisse bezüglich der Tourlänge liefert.

Nach dem veranschaulichenden Beispiel sollen im Folgenden die zwei Zielstellungen *Minimierung der Gesamtlänge aller Touren* und *Minimierung der Wartezeit*⁴¹⁵ aller Kunden betrachtet werden. Ausgehend von einer Tour T , mit $T = [0, i_1, i_2, \dots, i_n, 0]$ ergeben sich als Formeln

- für die Minimierung der Wartezeit W_T

$$W_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} (c_{j,j+1} + SZ_{j+1}) \rightarrow \min$$

- und für die Minimierung der Tourlänge L_T

$$L_T = \sum_{j=0}^{n-1} c_{j,j+1} + c_{n0} \rightarrow \min .^{416}$$

Die Standzeit SZ_i des Kunden i sei im Folgenden für alle Kunden i gleich groß und kann daher vernachlässigt werden. Wird die Formel für W_T wie folgt aufgeschrieben

$$\begin{aligned} W_T &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} c_{j,j+1} = c_{01} + (c_{01} + c_{12}) + (c_{01} + c_{12} + c_{23}) + \dots + (c_{01} + c_{12} + \dots + c_{n-1,n}) \\ &= n \cdot c_{01} + (n-1) \cdot c_{12} + \dots + 1 \cdot c_{n-1,n} , \end{aligned}$$

ist zu erkennen, dass das erste Teilstück der zu bildenden Tour das größte Gewicht erhält und das letzte Teilstück das kleinste. Die Gewichte nehmen von n bis 1 kontinuierlich ab. Der Rückweg zum Depot wird bei der Optimierung nach der Wartezeit nicht berücksichtigt.

Wird die Formel der Tourlänge L_T aufgelöst

$$L_T = c_{01} + c_{12} + \dots + c_{n-1,n} + c_{n0} ,$$

ist ersichtlich, dass jedes Teilstück der Tour ein identisches Gewicht hat und dass die Berücksichtigung des Rückweges vom letzten Kunden zum Depot erfolgt. Bei den bereits aufgestellten Modellen wurde zur *Minimierung der Tourlänge der Traveling Salesman Tour* (DTSP) bzw. zur *Minimierung der Gesamtlängen aller Touren* (DVRP) der Ausdruck

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad \text{bzw.} \quad \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} \sum_{k=1}^p x_{ijk} \rightarrow \min$$

gewählt.

⁴¹⁵ Die Wartezeit wird hier als die Zeitspanne zwischen Auftragseingang und Abfahrt des Fahrzeuges beim Kunden (Serviceendzeitpunkt) definiert.

⁴¹⁶ Da in dieser Arbeit die Annahme gilt, dass sich die Fahrzeit proportional zur Fahrstrecke verhält, wird in die Formel zur Wartezeitbestimmung c_{ij} an Stelle von t_{ij} geschrieben, um die verschiedenen Zielfunktionen direkt miteinander vergleichen zu können. Vgl. hierzu auch Kap. 4.2.2.

Im Rahmen dieser Arbeit gilt die Annahme, dass sich die Fahrzeit proportional zur Fahrstrecke verhält. Infolgedessen impliziert die Minimierung der Fahrstrecke auch eine Minimierung der Fahrzeit. Beide Zielfunktionen enthalten die Länge der Kanten c_{ij} (Verbindungen, die zu fahren sind). Der Unterschied ist lediglich, dass bei der Minimierung der Tourlänge der Rückweg zum Depot berücksichtigt wird und bei der Minimierung der Wartezeit Gewichte nach der Reihenfolge der ausgewählten Kanten vergeben werden.

Da alle in dieser Arbeit vorgestellten Heuristiken auf die Minimierung der Kantenbewertungen abzielen, sind sie auch für die Minimierung der Wartezeit über alle Kunden W_T geeignet. Durch die verwendete Systematik in der jeweiligen Heuristik schneiden sie jedoch unterschiedlich ab. An dieser Stelle wird bereits auf die Testergebnisse in Kapitel 4.5.2 verwiesen. Diese bestätigen, dass die Heuristik Bester Nachfolger in Bezug auf die Minimierung der Wartezeit die besten Ergebnisse erzielt. Die Heuristik Bester Nachfolger wählt vor allem anfänglich besonders kurze Strecken aus (d. h. gerade die Teilstücke, die ein hohes Gewicht bekommen), lässt aber andererseits einen eventuellen langen Rückweg zum Depot unbeachtet. Insbesondere die modifizierte Heuristik Bester Nachfolger mit der Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug möglich* schneidet besser ab als die Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich*, da die Möglichkeit des kurzfristigen Abbiegens zu neuen dynamischen Kunden sich zusätzlich positiv auf die Minimierung der Wartezeit auswirkt.

Ferner ist zu ergänzen, dass die Gewichtung der Zielkriterien Tourlänge und Wartezeit auch durch die zugrundeliegende praktische Problemstellung determiniert wird.⁴¹⁷ Bei einigen Aufgabenstellungen ist primär die Tourlänge zu minimieren und bei anderen primär die Wartezeit. Neben der Problemstellung kann auch der Grad der Dynamik eine Einflussgröße sein. Je mehr dynamische Kunden zu beachten sind (höherer Grad der Dynamik), d. h. mehr Kunden, bei denen eine Ladung noch am gleichen Tag abgeholt werden soll, desto wichtiger sollte die Minimierung der Wartezeit bezüglich dieser Kunden sein. Denn diese Kunden haben i. d. R. sehr dringende Ladungen zu versenden, die aus Sicht der Kunden so schnell wie möglich abgeholt und transportiert werden müssen. Hier wird dementsprechend der Transporteur im Sinne einer hohen Kundenzufriedenheit eher das Kriterium Wartezeitminimierung gegenüber dem Kriterium Tourlängenminimierung präferieren. Liegen hingegen fast nur statische Kunden vor (geringer Grad der Dynamik), d. h. Kunden die mindestens einen Tag im Voraus ihren Transportauftrag bekannt gegeben haben, wird der Tourenplaner im Vorhinein des betreffenden Tages, für den die geplanten Touren gelten, stärker auf die Minimierung der Tourlänge achten können. Statische Kunden werden i. d. R. zufrieden sein, wenn von Seiten des Transporteurs ihnen mitgeteilt wird, wann die Abholung ihrer Ladung

⁴¹⁷ Vgl. Kapitel 3.5.

am betrachteten Tag erfolgt, ohne dass sie selber besonderen Wert darauf legen, dass die Ware besonders zeitig abgeholt wird.

4.5 Durchführung numerischer Tests

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden durch den Autor umfangreiche numerische Tests mit den zuvor beschriebenen neu entwickelten Verfahren auf Basis zweier eigens entwickelter Softwareprogramme durchgeführt. Ziel der Tests war zum einen die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Verfahren, da die Verifizierung der Verfahren nicht nur durch die Lösung von wenigen Beispielen manuell per Hand, sondern durch die Rechnung von mehreren tausend zufällig erzeugten Beispielen per Computer erfolgen sollte. Dabei fand beispielsweise die Überprüfung statt, ob die Verfahren auch bei Problemstellungen mit 50 und mehr Knoten zuverlässig ein Ergebnis erzielen und Rechenzeiten von wenigen Sekunden gewährleisten. Zum anderen wurde sowohl für das DTSP als auch für das DVRP das Verhalten der Verfahren bei verschiedenen Parameterkombinationen, die sich aus unterschiedlichen Ausprägungen der Merkmale Größe des Operations- bzw. Liefergebietes, Geschwindigkeit der Fahrzeuge, Gesamtkundenanzahl, Anteil dynamischer Kunden und Länge des Auftragseingangszeitraumes zusammensetzen, analysiert, um gegebenenfalls Empfehlungen für den Einsatz der Verfahren bei verschiedenen Rahmenbedingungen zu geben. Darüber hinaus fand beim DTSP ein Vergleich der Verfahren modifizierte Sukzessive Einbeziehung, modifiziertes Verfahren von Christofides, modifizierter Bester Nachfolger und modifiziertes Savingsverfahren (für DTSP) untereinander und der Verfahrensalternativen *aktuellen Fahrzeugzug ändern* oder *aktuellen Fahrzeugzug nicht ändern* statt, da alle Verfahren implementiert wurden. Beim DVRP erfolgte hingegen nur ein Vergleich der Verfahrensalternativen *aktuellen Fahrzeugzug ändern* oder *aktuellen Fahrzeugzug nicht ändern*, da hier lediglich die Umsetzung des modifizierten Savingsverfahrens (für DVRP), in einer Software geschah. Im Folgenden wird zunächst in Unterkapitel 4.5.1 der prinzipielle Aufbau der Tests und die benutzte Software beschrieben. Unterkapitel 4.5.2 enthält die Auswertung der Testergebnisse und Unterkapitel 4.5.3. befasst sich mit einigen Umsetzungshinweisen zu den vorgestellten Heuristiken.

4.5.1 Beschreibung der Testsoftware

Der Autor erstellte für die Durchführung der Tests zwei Softwareprogramme, wobei das eine zur Lösung des dynamischen Traveling Salesman Problems unter Anwendung der vier Heuristiken modifiziertes Verfahren Bester Nachfolger, modifiziertes Verfahren Sukzessive Einbeziehung, modifiziertes Verfahren von Christofides und modifiziertes Savingsverfahren (für

DTSP) und das andere zur Bearbeitung des dynamischen Vehicle Routing Problems durch Benutzung der Heuristik modifiziertes Savingsverfahren (für DVRP) dient.⁴¹⁸

Im Rahmen der Tests erfolgte die Lösung von mehr als 30.000 verschiedenen Beispielen zum DTSP und DVRP. Würde jedes Beispiel wie in der betrieblichen Praxis gelöst, d. h. mit realem Zeitablauf, nähme das, bei einem Beispiel mit über 8 Stunden verteiltem Auftragseingang der dynamischen Kunden, eine Zeit von 8 Stunden zuzüglich der Zeitspanne vom letzten Auftragseingang bis zu dem Zeitpunkt, bei dem alle Fahrzeug wieder am Depot sind, in Anspruch. Bei dieser Variante würde der Disponent zuerst nur die statischen Kunden und später zu den entsprechenden Zeitpunkten die dynamischen Kunden in sein Planungstool eingeben. Diese Variante wäre zu zeitintensiv und würde großen Aufwand für die Eingabe der Daten verursachen. Daher erfolgte die Wahl einer anderen Vorgehensweise, bei der die durch den Autor geschriebenen Programme im Zeitrafferablauf arbeiten und die Möglichkeit besitzen, selbst zufällige Beispieldaten⁴¹⁹ zu erzeugen und zu verwalten, damit Eingaben bei der Testdurchführung durch den Benutzer überflüssig werden. Konkret bedeutet dies, dass die Programme aus einer Art "Mantelteil" bestehen, der die Beispieldaten kennt und verwaltet, sowie aus einer Art "Kernteil", der die entsprechende Heuristik anwendet und die dynamischen Daten Schritt für Schritt vom Mantelteil erhält. Der Mantelteil ist auch für die Bestimmung der Beispiele per Zufallsgenerator zuständig.

Abbildung 4-29 veranschaulicht den allgemeinen Ablauf, der in den Programmen für die Lösung eines beliebigen Beispiels implementiert wurde, hier speziell für das Programm zum DVRP. Für das Programm zum DTSP vereinfacht sich der Ablauf, da nur eine Tour gebildet wird und keine Kapazitäten zu beachten sind. Mantelteil und Kernteil gehen bei der Programmierung fließend ineinander über, sodass in Abbildung 4-29 keine strikte Trennung von Mantel- und Kernteil möglich ist.

⁴¹⁸ Der Einsatz von Verbesserungsverfahren wurde bei den Tests nicht durchgeführt, da sich dann die Berechnungszeiten zum Teil in Abhängigkeit von dem benutzten Verbesserungsverfahren stark erhöht hätten.

⁴¹⁹ Zur Bestimmung der Beispieldaten wurde Gleichverteilung für die Erzeugung der Kundenstandortkoordinaten, der Auftrittszeitpunkte der dynamischen Kunden und der Kundenbedarfe (nur beim DVRP notwendig) unterstellt.

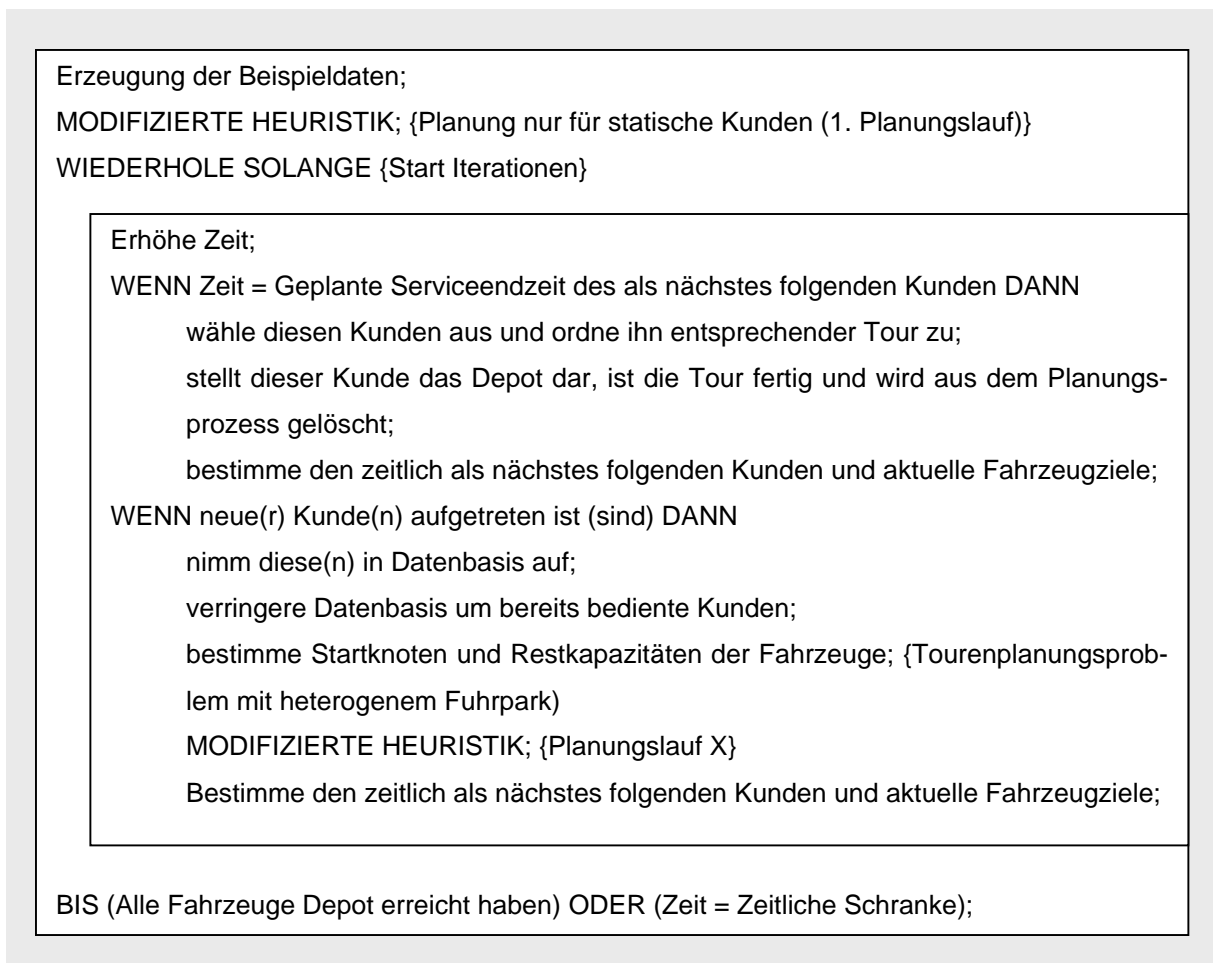


Abb. 4-29: Allgemeine Programmstruktur der Testsoftware

Die Benutzeroberfläche der DTSP-Software zeigen Abbildung 4-30 und 4-31, wobei Abbildung 4-31 speziell die Möglichkeiten zur grafischen Darstellung von Ergebnissen präsentiert. Wie in Abbildung 4-30 erklärt wird, können eigene Beispiele, deren Eingabe durch den Benutzer erfolgt, oder ein oder mehrere zufällig erzeugte Beispiele gerechnet werden. Insbesondere für die umfangreichen Tests kann eine Vorgabe der genauen Anzahl an zufällig zu erzeugenden und zu rechnenden Beispielen für den Computer erfolgen. Die Programme erzeugen bei der Berechnung und der Ergebnisdarstellung von mehreren Beispielen zwei Dateien, anhand derer bestimmte Auswertungen und Vergleiche möglich sind. Der genaue Inhalt der Dateien wird in Kapitel 4.5.2 erläutert.

Eingabe der Auswertungsparameter

Gesamtkundenanzahl: 100
 Anzahl dynamische Kunden: 60
 Länge Auftragseingangszeitraum: 4
 Anzahl Durchläufe: 100
 OK

Simulationstool

DATEI ZUFALLSGENERATOR VERFAHREN AUSWERTUNG ZEICHNEN

Kundenanzahl: 14

Kundenknoten:

NR	X	Y	SZ	AZ
0	50	50	0	8
1	65	46	0	8
2	12	53	0	8
3	3	25	0	8
4	38	54	0	8
5	45	69	0	8
6	7	68	0	8
7	88	91	0	8
8	8	30	0	8,39
9	34	97	0	8,42
10	4	21	0	8,69
11	36	27	0	9,56
12	97	34	0	10,73
13	10	38	0	11,14
14	6	60	0	11,23

☒ Warten beim letzten Kunden?
 Alle Einträge löschen
 Geschwindigkeit: 50
 Skalierung: 1

Tour (bei Änderung aktueller Zug):

Sukzessive Einbeziehung						Verfahren von Christofides						Bester Nachfolger						Savingsverfahren						
Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	
1	D				0	1	D				0	1	D				0	1	D				0	
2	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64
3	10	8,69	9,204	0,514	0,767	60,20	8	8,39	9,309	0,919	1,172	65,48	5	8	8,584	0,584	0,837	29,20	10	8,69	9,204	0,514	0,767	60,20
4	3	8	9,286	1,286	2,053	64,32	8	9,451	1,451	2,624	72,56	9	8,42	9,185	0,765	1,602	59,28	3	8	9,286	1,286	2,053	64,32	
5	8	8,39	9,428	1,038	3,092	71,40	10	8,69	9,533	0,843	3,468	76,68	6	8	9,978	1,978	3,581	98,90	8	8,39	9,428	1,038	3,092	71,40
6	11	9,56	10,130	0,570	3,662	106,4	6	8	10,47	2,476	5,944	123,8	2	8	10,29	2,294	5,875	114,7	5	8	10,97	2,975	6,067	148,7
7	2	8	10,83	2,837	6,499	141,8	2	8	10,79	2,792	8,737	139,6	8	8,39	10,76	2,371	8,247	138,0	1	8	11,58	3,585	9,652	179,2
8	6	8	11,15	3,154	9,654	157,6	14	11,23	11,71	0,489	9,226	185,9	3	8	10,90	2,903	11,15	145,1	12	10,73	12,26	1,538	11,19	213,4
9	14	11,23	11,31	0,088	9,742	165,9	13	11,14	12,16	1,026	10,25	208,2	10	8,69	10,98	2,295	13,44	149,2	7	8	13,42	5,423	16,61	271,1
10	13	11,14	11,76	0,626	10,36	188,2	11	9,56	12,73	3,171	13,42	236,5	13	11,14	11,45	0,313	13,75	172,6	9	8,42	14,50	6,089	22,70	325,4
11	5	8	12,70	4,701	15,07	235,0	1	8	13,42	5,424	18,84	271,1	14	11,23	11,90	0,670	14,42	195,0	6	8	15,30	7,302	30,00	365,0
12	9	8,42	13,30	4,882	19,95	265,1	12	10,73	14,10	3,378	22,22	305,3	11	9,56	12,79	3,232	17,66	239,6	14	11,23	15,46	4,233	34,24	373,1
13	7	8	14,38	6,389	26,34	319,4	7	8	15,26	7,262	29,48	363,0	1	8	13,48	5,485	23,14	274,2	2	8	15,64	7,648	41,88	382,3
14	12	10,73	15,54	4,813	31,15	377,1	9	8,42	16,34	7,928	37,41	417,4	12	10,73	14,16	3,418	26,58	308,4	13	11,14	15,95	4,810	46,70	397,5
15	1	8	16,22	8,227	39,38	411,3	5	8	16,95	8,950	46,36	447,4	7	8	15,32	7,324	33,91	366,1	11	9,56	16,51	6,955	53,65	425,7
16	D		16,53			426,8	D		17,34			467,1	D		16,44			422,0	D		17,05			452,6
17																								

Tour (bei KEINE Änderung aktueller Zug):

Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	Pos	Kd	AZ	SEZ	WZ	WZgesamt	
1	D				0	1	D				0	1	D				0	1	D				0	
2	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64	4	8	8,252	0,252	0,252	12,64
3	3	8	9,162	1,162	1,415	58,10	3	8	9,162	1,162	1,415	58,10	5	8	8,584	0,584	0,837	29,20	3	8	9,162	1,162	1,415	58,10
4	10	8,69	9,244	0,554	1,969	62,22	10	8,69	9,244	0,554	1,969	62,22	9	8,42	9,185	0,765	1,602	59,28	10	8,69	9,359	0,669	2,084	67,95
5	8	8,39	9,441	1,051	3,021	72,07	8	8,39	9,441	1,051	3,021	72,07	6	8	9,978	1,978	3,581	98,90	3	8	9,441	1,441	3,525	72,07
6	2	8	9,908	1,908	4,929	95,41	2	8	9,908	1,908	4,929	95,41	2	8	10,29	2,294	5,875	114,7	6	8	10,30	2,305	5,831	115,2
7	6	8	10,22	2,224	7,154	111,2	6	8	10,22	2,224	7,154	111,2	8	8,39	10,76	2,371	8,247	138,0	2	8	10,62	2,621	8,452	131,0
8	9	8,42	11,01	2,597	9,752	150,8	11	9,56	11,22	1,369	8,824	161,4	3	8	10,90	2,903	11,15	145,1	11	9,56	11,32	1,769	10,22	166,4
9	5	8	11,61	3,619	13,37	180,9	13	11,14	11,79	0,653	9,478	189,6	10	8,69	10,98	2,295	13,44	149,2	13	11,14	11,89	0,754	10,97	194,6
10	7	8	12,58	4,585	17,95	229,2	14	11,23	12,24	1,011	10,48	212,0	11	9,56	11,63	2,076	15,52	181,8	14	11,23	12,34	1,111	12,08	217,0
11	12	10,73	13,73	3,009	20,96	286,9	9	8,42	13,16	4,799	15,23	298,4	13	11,14	12,20	1,061	16,58	210,0	3	8	13,26	4,849	16,93	263,4
12	1	8	14,42	6,422	27,38	321,1	7	8	14,25	6,255	21,49	312,7	14	11,23	12,64	1,418	18,00	232,4	7	8	14,35	6,356	23,29	317,7
13	11	9,56	15,11	5,556	32,94	355,7	5	8	15,22	7,223	28,71	361,0	1	8	13,86	5,861	23,86	293,0	12	10,73	15,51	4,780	28,07	375,4
14	13	11,14	15,68	4,541	37,48	384,0	12	10,73	16,47	5,745	34,46	373,7	12	10,73	14,54	3,815	27,67	327,2	1	8	16,18	8,193	36,26	409,6
15	14	11,23	16,12	4,898	42,38	406,3	1	8	17,15	9,159	3,62	453,9	7	8	15,69									
16	D		17,03			451,5	D		17,46			473,0	D		16,81									
17																								

Ergebnisausgabe für Verfahren mit Änderung aktueller Zug möglich

Ergebnisausgabe für Verfahren mit Änderung aktueller Zug nicht möglich

Ergebnisausgabe enthält:
 Kd.. Ausgabe der Bedienungsreihenfolge
 AZ.. Auftrittszeit des Kunden
 WZ.. Wartezeit pro Kunde
 WZgesamt.. WZ kumuliert
 TL.. Tourlänge
 SEZ.. Serviceendzeitpunkt
 (wenn Standzeiten zu beachten sind)

Ausgabe der Beispieldaten, zugleich auch Eingabe und Editieren von Daten möglich
 Nr.. Bezeichnung Knoten
 X.. X-Koordinate
 Y.. Y-Koordinate
 SZ.. Standzeit beim Kunden
 AZ.. Auftrittszeit des Kunden

Eingabe der Fahrzeuggeschwindigkeit und Eingabe der Liefergebietsgröße

Abb. 4-30: Benutzeroberfläche DTSP-Software

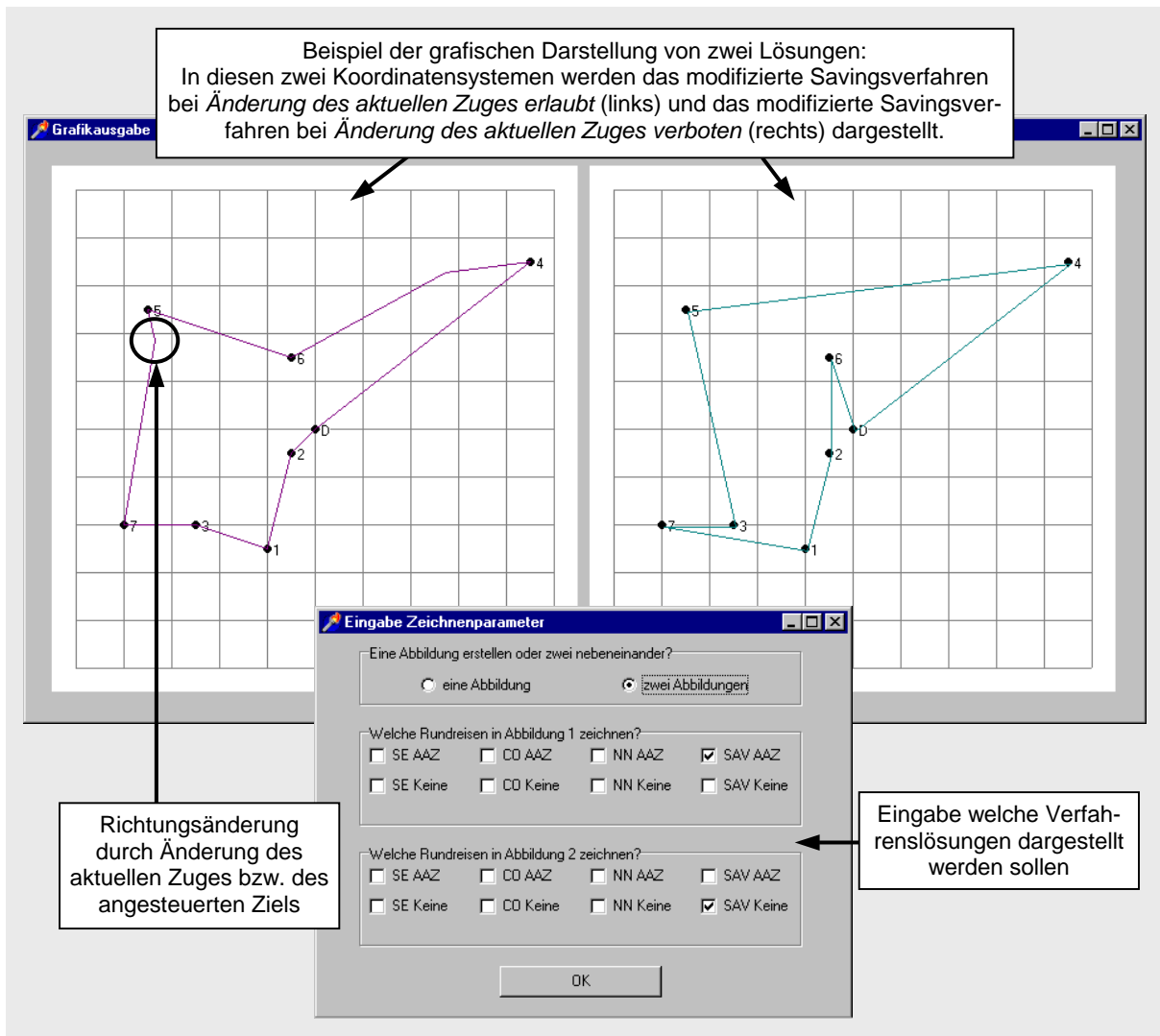


Abb. 4-31: Grafische Veranschaulichungsmöglichkeiten der Verfahrenslösungen in der DTSP-Software

Die Benutzeroberfläche der DVRP-Software veranschaulicht Abbildung 4-32. Dabei ist zu beachten, dass nur das Bildschirmfenster mit der Lösungsausgabe für die Verfahrensvariante mit *Änderung des aktuellen Zuges möglich* dargestellt ist. Gleiches gilt für die grafische Darstellung der Lösung. Für die Variante *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich* gehen bei Benutzung des Programms zwei weitere Bildschirmfenster auf. Der Benutzer kann so zwischen den Bildschirmfenstern hin und her wechseln und dabei die Lösungsvarianten *Änderung des aktuellen Zuges möglich* bzw. *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich* vergleichen.

Beide Softwareprogramme wurden in Delphi geschrieben. Das Programm zum DTSP umfasst ca. 6000 Zeilen Quellcode und das zum DVRP ca. 3000 Zeilen Quellcode.⁴²⁰

⁴²⁰ Interessenten für die Programme oder Quellcodes können sich gerne an den Autor wenden.

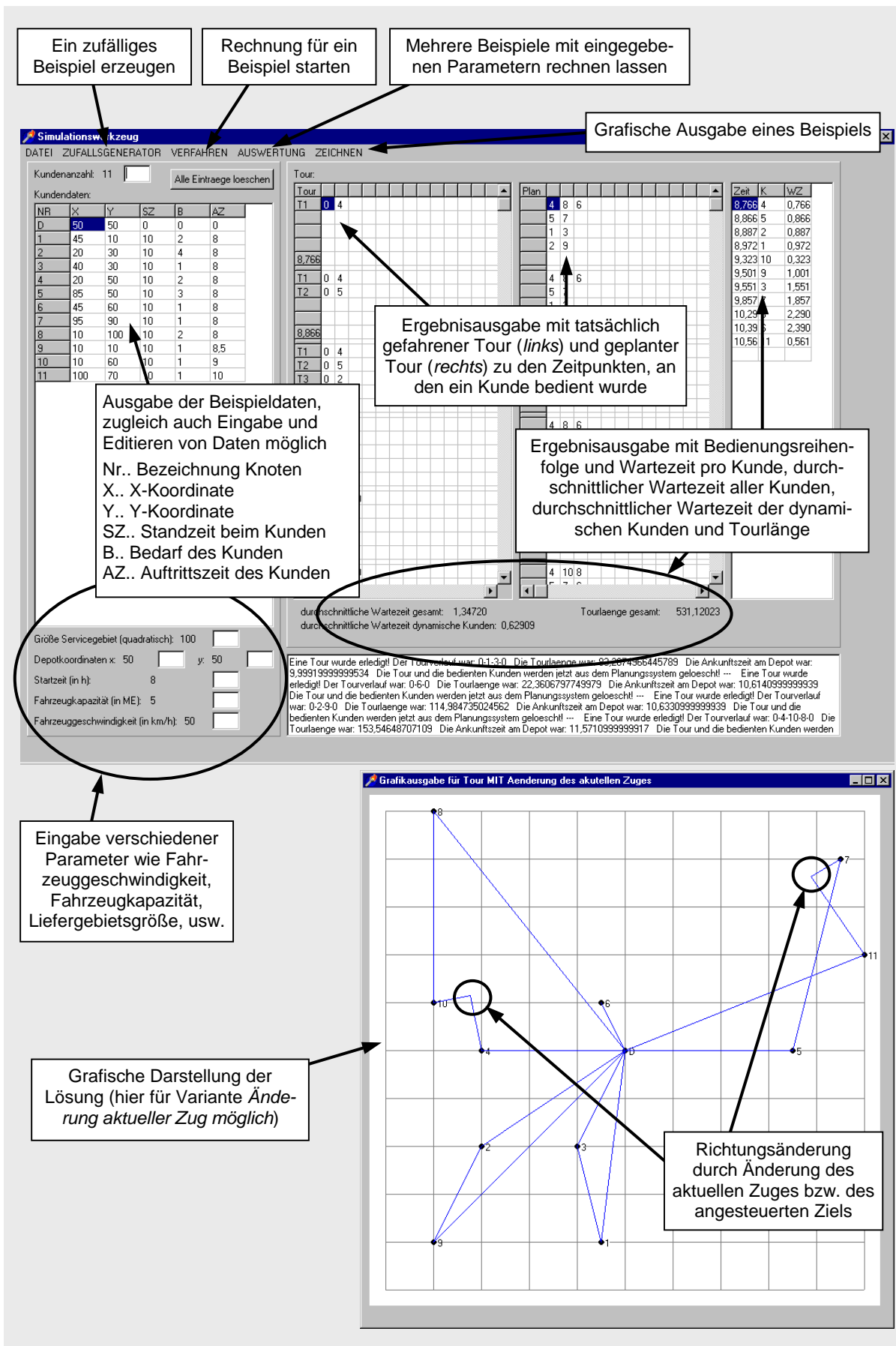


Abb. 4-32: Benutzeroberfläche DVRP-Software und grafische Lösungsdarstellung

4.5.2 Auswertung der Testergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Testläufe mit dem Ziel, verallgemeinerte Aussagen über die Vorteilhaftigkeit einer der Varianten *Änderung aktueller Zug erlaubt* oder *Änderung aktueller Zug verboten* treffen zu können. Ferner sollen die Heuristiken für das DTSP untereinander verglichen werden. Ein Testlauf umfasst jeweils 1.000 gerechnete zufällig erzeugte Beispiele mit identischer Parameterkombination. Als Parameter für das DTSP und das DVRP wurden die Gesamtkundenanzahl, der Anteil dynamischer Kunden, die Länge des Auftragseingangszeitraumes und die Größe des Operations- bzw. Liefergebietes variiert. Es erfolgte die Einbeziehung folgender Merkmalsausprägungen:

- Gesamtkundenanzahl: 50, 100 und 200 Kunden
- Anteil dynamischer Kunden (DOD): 20 %, 50 % und 80 % von der Gesamtkundenanzahl
- Größe des Operations- bzw. Liefergebietes: 20 km x 20 km und 100 km x 100 km
- Länge des Auftragseingangszeitraumes: 4 h und 8 h
(ab Start der Fahrzeuge am Depot)
- Geschwindigkeit: 50 km/h (konstant)
- Kein zeitlich beschränktes Ende für die Durchführung der Touren

Die später in diesem Unterkapitel präsentierten Ergebnisübersichten enthalten aus Platzgründen und zwecks der Übersichtlichkeit nicht alle möglichen Kombinationen. Die Einschränkung der Darstellung auf insgesamt 30 Testläufe (30.000 Beispiele), die sich aus 18 Testläufen zum DTSP und 12 Testläufen zum DVRP zusammensetzen, war möglich, da die angegebenen Testläufe die selben Aussagen zulassen, wie eine Auflistung aller Ergebnisse.

Beim DTSP erfolgt die Präsentation der Ergebnisse von 18 Testläufen, das entspricht 18.000 gerechneten Beispielen. Sechs Testläufe wurden mit 50 Gesamtkunden, sechs mit 100 Gesamtkunden und sechs mit 200 Gesamtkunden durchgeführt. Bei den Beispielen mit 50 und 100 Gesamtkunden erfolgte bei den Testläufen entweder die Einstellung Auftragseingangszeitraum 4 h in Kombination mit Operationsgebietsgröße 20 km x 20 km oder Auftragseingangszeitraum 8 h in Kombination mit Operationsgebietsgröße 100 km x 100 km. Für die Beispiele mit 200 Gesamtkunden wurden diese Kombinationen getauscht (d. h. Auftragseingangszeitraum 8 h in Kombination mit Operationsgebietsgröße 20 km x 20 km und Auftragseingangszeitraum 4 h in Kombination mit Operationsgebietsgröße 100 km x 100 km).

Beim DVRP wurden nur Beispiele mit 50 und 100 Gesamtkunden gerechnet. Zusätzlich ist für das DVRP zu beachten, dass die Festlegung der Fahrzeugkapazität auf 30 ME erfolgte und dass die Bedarfe und die Standzeiten für die Kunden zufällig bestimmt wurden, wobei

der Bedarf je Kunde zwischen 1 ME und 5 ME und die Standzeit je Kunde zwischen 5 Minuten und 20 Minuten variiert. Auch hier sind aus Platzgründen und bezüglich der Übersichtlichkeit nicht alle möglichen Parameterkombinationen dargestellt. Die Ergebnistabellen zeigen die Auswertung von zwölf Testläufen (12.000 gerechnete Beispiele), die sich aus sechs Testläufen mit 50 Gesamtkunden und sechs Testläufen mit 100 Gesamtkunden zusammensetzen. Bei den Beispielen mit 50 Gesamtkunden erfolgte die Einstellung Auftragseingangszeitraum 4 h entweder in Kombination mit Operationsgebietsgröße 20 km x 20 km oder in Kombination mit Operationsgebietsgröße 100 km x 100 km. Die Beispiele mit 100 Gesamtkunden weisen entweder die Parameterkonstellation Auftragseingangszeitraum 4 h und Operationsgebietsgröße 20 km x 20 km oder die Parameterkonstellation Auftragseingangszeitraum 8 h und Operationsgebietsgröße 100 km x 100 km auf. Sowohl beim DTSP als auch beim DVRP fand grundsätzlich je Gesamtkundenanzahl die Betrachtung eines schwach (20 % Anteil dynamischer Kunden), eines moderat (50 %) und eines stark dynamischen (80 %) Zustandes statt.

Für die Auswertung der Testläufe erfolgte die Analyse der durch die zwei Softwareprogramme erzeugten Ergebnisdateien. Bei der DTSP-Software enthält die Ergebnis- bzw. Auswertungsdatei folgende Daten:

- Für alle zufällig erzeugten und gerechneten Beispiele eines Testlaufes werden jeweils die Tourlänge, die kumulierte Wartezeit über alle Kunden, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und die durchschnittliche Wartezeit über die dynamischen Kunden je Verfahren (einschließlich der Unterscheidung nach den Alternativen *Änderung des aktuellen Zuges möglich* bzw. *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich*) ausgegeben.
- Je Beispiel erfolgt anhand der Ergebnisse der Verfahren die Bildung einer Rangfolge. Am Ende des Testlaufes findet die Ausgabe des durchschnittlichen Ranges statt. Dieser wird für die Tourlänge, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden gebildet.
- Über alle Beispiele eines Testlaufes erfolgt die Bestimmung, wie oft jedes Verfahren das beste Ergebnis (d. h. Rang 1) erzielt hat. Dies geschieht ebenfalls für die Tourlänge, die durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und die durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden.
- Des Weiteren findet je Verfahren die Ermittlung statt, wie oft die Variante *Änderung des aktuellen Zuges möglich* besser abschneidet, wie oft die Variante *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich* besser abschneidet und wie oft beide Varianten zu identischen Ergebnissen führen. Das bedeutet, jedes Verfahren (modifizierte Sukzessive Einbeziehung, modifiziertes Verfahren von Christofides, modifizierter Bester Nachfolger oder

modifiziertes Savingsverfahren) wird isoliert für sich betrachtet und es erfolgt innerhalb des Verfahrens nur ein Vergleich der Varianten *Änderung des aktuellen Zuges möglich* vs. *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich*. Eine Differenzierung nach den Kriterien Tourlänge, durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden erfolgt hier erneut.

- Damit einhergehend wird die prozentuale Abweichung zwischen den Lösungen der zwei Varianten (*Änderung des aktuellen Zuges möglich/nicht möglich*) angegeben. Folgendes Beispiel veranschaulicht die Notwendigkeit der Angabe der prozentualen Abweichung: Es kann passieren, dass bei 80 % der Beispiele die Variante *Änderung des aktuellen Zuges möglich* absolut betrachtet besser ist (vgl. vorherigen Aufzählungspunkt), tatsächlich das Ergebnis dieser 80 % aber nur um 1 % besser ist als die Variante *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich*. Bei den anderen 20 % der Unterschied u. U. mehr als 10 % zwischen beiden Alternativen beträgt. Somit könnte die Analyse der prozentualen Abweichung zu einem anderen Ergebnis kommen als die Beurteilung der absoluten Vorteilhaftigkeit.
- Neben der Ausgabe der Tourlänge je Beispiel (vgl. ersten Aufzählungspunkt), erfolgt außerdem die Angabe der durchschnittlichen Tourlänge über alle Beispiele des Testlaufes.
- Zuletzt wird der Zielkonflikt zwischen Minimierung der Tourlänge und Minimierung der Wartezeit analysiert. Dazu findet bei jedem Beispiel der Vergleich statt, ob das Verfahren, dass die kürzeste Tourlänge bestimmt hat (d. h. 1. Rang bei Tourlänge) auch das beste ist in Bezug auf die kürzeste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden (1. Rang bei durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden) und, ob das Verfahren, dass die kürzeste Tourlänge bestimmt hat (d. h. 1. Rang bei Tourlänge), auch das Beste in Bezug auf die kürzeste durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden ist (1. Rang bei durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden).

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Testläufen zu den zuvor aufgezählten Kennzahlen bzw. Analysebereichen für das DTSP dargestellt (vgl. Tabelle 4-16 bis 4-25). Der Tabellenkopf enthält neben der analysierten Fragestellung bzw. Kennzahl die abgekürzten Bezeichnungen der acht neuen Verfahren (vgl. Kapitel 4.2), die es zu vergleichen gilt. Eine Verfahrensabkürzung setzt sich immer aus der Algorithmenbezeichnung ('SE' = modifizierte Sukzessive Einbeziehung, 'CO' = modifiziertes Verfahren von Christofides, 'NN' = modifizierter Bester Nachfolger, 'SAV' = modifiziertes Savingsverfahren) und der verwendeten Alternative *Änderung aktueller Zug möglich* ('AAZ') oder *Änderung aktueller Zug nicht möglich* ('KEINE') zusammen.

Die ersten drei Tabellen befassen sich mit der Auswertung der Tourlänge als Zielkriterium. Zuerst (vgl. Tabelle 4-16) erfolgt die Angabe der durchschnittlichen Ränge der Verfahren (Vergabe der Ränge 1 bis 8). Dabei gilt es zu beachten, dass ein Rang auch mehrmals vergeben wird (z. B. zwei 3. Plätze), wenn zwei oder mehrere Verfahren in einem Beispiel exakt das gleiche Ergebnis erzielt haben. Infolgedessen ergibt sich die Möglichkeit, dass bei der Summierung der durchschnittlichen Platzierungen ein Wert von kleiner 36 entsteht. Nur wenn jedem Verfahren genau eine Platzierung zugewiesen werden kann, d. h. zwei oder mehrere Verfahren liefern nicht ein identisches Ergebnis, ergibt die Summe über alle durchschnittlichen Platzierungen einen Wert von 36. Die zweite Tabelle (vgl. Tabelle 4-17) zeigt, wie oft ein Verfahren in Bezug auf die Tourlänge Rang 1 erreicht hat. Dabei kann die Summe über alle Verfahren größer als die Anzahl der Testläufe (d. h. > 1000) sein, wenn zwei Verfahren in einem Beispiel exakt die gleichen Ergebnisse erzielt haben. Die dritte Tabelle zur Tourlänge (vgl. Tabelle 4-18) gibt in Prozent an, wie oft jeweils die Variante *Änderung aktueller Zug erlaubt* oder die Variante *Änderung aktueller Zug verboten* gegenüber ihrem Konträr besser war. Hier ist zu beachten, dass sich beide Möglichkeiten nicht immer zu 100 % addieren, da noch die Alternative, dass beide Varianten zum selben Ergebnis kommen, vorliegen kann. In dieser Tabelle kann dementsprechend nur je Verfahren die Alternative 'AAZ' mit 'KEINE' (SE AAZ und SE KEINE sowie CO AAZ und CO KEINE usw.) gegenübergestellt werden, d. h. jedes Verfahren wird isoliert betrachtet.

An die Tabellen 4-16 bis 4-18 anschließend erfolgt jeweils in drei weiteren Tabellen die Auswertung der Zielkriterien durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden (vgl. Tabellen 4-19 bis 4-21) und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden (vgl. Tabellen 4-22 bis 4-24). Dabei werden die gleichen Sachverhalte wie bei der Tourlänge untersucht. Tabelle 4-25 stellt dar, wie oft ein Verfahren sowohl bei Tourlänge als auch bei durchschnittlicher Wartezeit über alle Kunden Rang 1 erreicht hat und wie oft ein Verfahren sowohl bei Tourlänge als auch bei durchschnittlicher Wartezeit der dynamischen Kunden Rang 1 erreicht hat.

Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge erreicht?	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,62	3,04	4,90	3,55	5,55	4,41	5,84	4,01
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,25	3,51	3,86	4,08	5,00	5,18	6,03	4,54
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,48	4,28	3,96	4,66	4,58	5,19	5,27	4,59
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,51	3,62	4,16	4,14	4,68	5,03	6,32	4,33
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,39	4,02	3,81	4,49	4,56	5,39	5,58	4,77
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,14	3,41	4,31	4,45	4,68	5,08	6,25	4,62
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,53	3,67	3,80	4,35	4,40	4,86	6,59	4,66
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,17	3,00	3,47	3,72	5,12	5,32	6,76	4,98
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,78	4,00	3,99	4,29	3,89	4,32	7,03	4,67
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,17	2,93	3,82	3,89	5,01	5,32	6,91	4,73
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,84	3,75	4,26	4,32	3,85	4,20	7,11	4,66
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,07	2,80	3,98	3,80	5,13	5,26	6,97	4,91
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,37	2,08	3,06	3,10	5,87	5,90	7,11	5,84
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	4,16	3,84	4,31	3,85	4,99	4,13	6,37	4,36
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,33	1,98	3,32	3,08	5,92	5,99	7,17	5,78
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	3,88	4,16	3,83	4,29	3,59	4,14	7,38	4,74
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,28	1,85	3,38	3,18	5,99	6,15	7,18	5,80
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	4,21	4,12	4,19	4,41	3,29	3,46	7,63	4,70
Durchschnitt	3,32	3,18	3,78	3,86	4,75	4,92	7,02	4,99

Tab. 4-16: DTSP Testauswertung - Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge erreicht?

(Abkürzungen: GK...Gesamtkundenanzahl, AEZ...Auftragseingangszeitraum)

Wie oft war jedes Verfahren bei Tourlänge am besten ?	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	89	308	78	205	52	113	34	133
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	257	201	190	155	68	54	34	109
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	224	133	159	99	111	89	77	110
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	221	180	156	148	81	57	36	139
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	249	144	160	109	124	66	60	88
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	269	199	138	109	98	62	37	94
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	214	199	187	104	112	65	35	102
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	247	269	216	151	40	29	15	56
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	195	158	173	133	152	103	13	82
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	243	281	146	144	54	43	11	89
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	166	192	127	122	186	118	6	85
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	245	279	141	154	61	38	12	74
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	299	380	155	159	2	2	0	8
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	126	184	102	196	93	166	21	112
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	292	424	106	166	4	2	0	8
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	178	128	177	116	206	116	4	76
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	284	470	99	132	2	2	1	11
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	128	127	120	112	221	201	1	90
Durchschnitt	218	258	146	141	94	74	10	66

Tab. 4-17: DTSP Testauswertung - Wie oft war jedes Verfahren bei Tourlänge am besten?

Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf Zielkriterium Tourlänge besser ? (in %)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,31	0,69	0,31	0,69	0,28	0,68	0,22	0,76
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,55	0,44	0,52	0,44	0,33	0,22	0,25	0,71
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,62	0,38	0,60	0,40	0,61	0,38	0,40	0,60
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,54	0,47	0,51	0,49	0,48	0,31	0,23	0,77
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,60	0,40	0,60	0,40	0,65	0,35	0,38	0,62
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,55	0,45	0,52	0,48	0,55	0,38	0,27	0,73
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,53	0,47	0,60	0,40	0,53	0,34	0,22	0,78
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,48	0,52	0,55	0,44	0,36	0,21	0,21	0,78
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,55	0,45	0,55	0,45	0,57	0,38	0,17	0,83
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,48	0,52	0,52	0,48	0,49	0,28	0,18	0,82
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,48	0,52	0,52	0,48	0,57	0,42	0,16	0,84
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,47	0,53	0,48	0,52	0,51	0,40	0,19	0,81
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,43	0,57	0,51	0,49	0,18	0,16	0,18	0,82
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,45	0,55	0,45	0,55	0,40	0,60	0,24	0,76
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,41	0,59	0,45	0,55	0,33	0,26	0,18	0,82
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,54	0,46	0,57	0,43	0,60	0,40	0,12	0,88
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,39	0,61	0,45	0,55	0,48	0,33	0,17	0,83
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,48	0,52	0,54	0,46	0,55	0,45	0,09	0,91
Durchschnitt	0,47	0,53	0,52	0,48	0,46	0,35	0,18	0,82

Tab. 4-18: DTSP Testauswertung - Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge besser?

Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden erreicht?	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,73	4,69	4,97	5,08	1,93	2,40	6,47	5,61
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,03	5,04	4,76	4,89	1,59	1,75	6,81	5,29
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,79	5,14	4,70	4,89	1,63	2,43	6,83	5,56
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,40	5,23	5,04	4,90	1,51	1,72	6,91	4,88
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,96	5,27	4,69	4,86	1,52	2,31	6,93	5,46
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,24	5,24	5,14	5,02	1,45	1,86	7,01	4,91
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	5,03	4,95	4,64	4,94	1,44	1,75	7,25	5,62
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,36	5,08	4,70	4,86	1,31	1,39	7,25	5,28
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	5,42	5,29	4,69	4,74	1,41	1,68	7,42	5,21
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,59	5,04	4,92	4,84	1,31	1,50	7,40	4,98
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	5,59	5,40	4,87	4,74	1,42	1,66	7,48	4,80
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,47	5,06	5,20	4,78	1,38	1,64	7,45	4,85
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	4,97	4,53	4,65	4,60	1,23	1,32	7,69	6,21
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	5,12	5,13	4,34	4,72	1,35	1,93	7,63	5,78
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	5,03	4,29	4,97	4,66	1,27	1,45	7,76	6,08
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	5,55	5,50	4,27	4,50	1,38	1,69	7,78	5,31
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	4,94	4,20	5,16	4,74	1,34	1,58	7,76	6,03
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	5,79	5,65	4,47	4,50	1,38	1,62	7,77	4,81
Durchschnitt	5,22	5,04	4,79	4,79	1,44	1,76	7,31	5,37

Tab. 4-19: DTSP Testauswertung - Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden erreicht?

Wie oft war jedes Verfahren bei durchschnittlicher Wartezeit über alle Kunden am besten?	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	73	74	64	56	528	230	18	33
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	56	60	74	66	677	592	13	17
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	69	37	60	35	626	162	11	25
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	33	34	26	40	656	498	6	29
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	48	16	42	25	670	191	6	7
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	17	17	15	18	667	366	1	21
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	27	38	43	28	716	456	1	8
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	26	26	47	34	781	716	0	19
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	14	9	20	19	659	399	0	7
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	6	10	21	18	750	587	0	9
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	2	6	7	5	622	404	0	4
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	10	10	4	14	675	453	0	6
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	21	25	24	39	826	768	0	2
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	9	11	36	24	720	199	0	6
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	9	16	10	19	791	626	0	6
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	2	2	15	8	651	344	0	0
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	3	13	3	10	707	498	0	0
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0	0	0	0	620	387	0	0
Durchschnitt	24	22	28	25	686	438	3	11

Tab. 4-20: DTSP Testauswertung - Wie oft war jedes Verfahren bei durchschnittlicher Wartezeit über alle Kunden am besten?

Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden besser? (in %)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,51	0,48	0,55	0,44	0,65	0,25	0,32	0,66
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,49	0,48	0,49	0,45	0,20	0,09	0,18	0,77
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,58	0,42	0,55	0,45	0,78	0,19	0,24	0,76
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,48	0,52	0,49	0,51	0,39	0,21	0,16	0,84
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,55	0,46	0,55	0,45	0,77	0,23	0,38	0,62
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,51	0,49	0,48	0,52	0,59	0,27	0,16	0,84
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,48	0,52	0,56	0,43	0,46	0,17	0,15	0,85
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,44	0,56	0,53	0,46	0,16	0,09	0,12	0,87
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,47	0,53	0,51	0,49	0,56	0,29	0,09	0,91
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,39	0,61	0,49	0,52	0,37	0,20	0,09	0,91
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,47	0,53	0,47	0,53	0,58	0,37	0,05	0,95
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,41	0,59	0,43	0,57	0,53	0,29	0,07	0,93
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,40	0,60	0,48	0,51	0,14	0,07	0,11	0,89
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,50	0,50	0,58	0,42	0,78	0,21	0,09	0,91
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,34	0,66	0,43	0,57	0,33	0,16	0,09	0,91
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,49	0,51	0,54	0,46	0,64	0,33	0,03	0,97
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,34	0,66	0,42	0,58	0,48	0,27	0,09	0,91
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,46	0,54	0,50	0,50	0,61	0,38	0,02	0,98
Durchschnitt	0,46	0,54	0,50	0,49	0,50	0,23	0,14	0,86

Tab. 4-21: DTSP Testauswertung - Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden besser?

Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden erreicht?	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,05	4,38	4,24	4,63	3,60	4,61	5,44	4,90
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,35	4,75	4,33	4,76	3,10	3,53	5,54	4,78
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,15	5,04	4,31	5,00	2,30	3,71	6,25	5,22
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,93	5,22	4,85	4,99	2,00	2,50	6,38	4,73
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,75	5,39	4,52	4,95	1,67	2,68	6,59	5,46
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,05	5,24	5,05	5,17	1,60	2,11	6,77	4,86
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,55	4,57	4,31	4,75	2,80	3,42	6,54	4,68
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,64	4,76	4,41	4,78	2,62	2,83	6,20	4,98
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	5,33	5,32	4,63	4,91	1,64	2,12	7,25	4,67
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,16	4,97	4,88	4,89	1,69	2,03	7,12	4,83
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	5,61	5,51	4,85	4,81	1,45	1,74	7,35	4,65
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	5,32	5,04	5,14	4,92	1,43	1,73	7,40	4,85
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	4,50	4,20	4,59	4,79	2,32	2,46	6,70	5,64
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	4,63	4,87	3,97	4,52	2,37	3,43	7,36	4,87
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	4,77	4,26	4,94	4,73	1,57	1,84	7,45	5,94
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	5,64	5,60	4,41	4,65	1,39	1,83	7,71	4,76
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	4,84	4,28	5,13	4,85	1,36	1,65	7,66	6,00
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	5,83	5,71	4,48	4,61	1,38	1,63	7,76	4,59
Durchschnitt	4,89	4,95	4,61	4,82	2,02	2,55	6,86	5,02

Tab. 4-22: DTSP Testauswertung - Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden erreicht?

Wie oft war jedes Verfahren bei durchschnittlicher Wartezeit der dynamischen Kunden am besten?	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	189	104	157	94	214	68	87	112
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	135	90	158	93	313	221	90	127
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	153	58	129	45	445	71	42	65
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	66	39	89	69	508	296	36	92
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	77	22	67	32	637	136	17	17
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	37	26	28	30	619	308	11	43
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	116	116	144	100	331	155	30	134
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	128	82	142	102	379	312	38	104
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	33	29	48	47	586	302	2	59
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	46	47	47	69	597	424	4	59
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4	6	8	12	629	374	0	12
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	17	10	19	15	668	415	1	16
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	115	141	99	101	434	382	25	53
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	106	74	174	83	396	60	6	102
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	38	74	41	61	655	480	2	17
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	5	6	19	17	672	287	0	15
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	5	22	9	10	709	468	0	4
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0	0	0	1	625	378	0	3
Durchschnitt	71	53	77	55	523	285	22	57

Tab. 4-23: DTSP Testauswertung - Wie oft war jedes Verfahren bei durchschnittlicher Wartezeit der dynamischen Kunden am besten?

Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynam. Kunden besser? (in %)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,57	0,42	0,61	0,39	0,70	0,20	0,43	0,55
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,56	0,41	0,54	0,40	0,25	0,04	0,35	0,60
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,67	0,33	0,62	0,38	0,83	0,14	0,33	0,67
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,56	0,44	0,54	0,46	0,45	0,15	0,27	0,73
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,59	0,42	0,58	0,42	0,79	0,20	0,29	0,71
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,55	0,45	0,52	0,48	0,60	0,26	0,20	0,80
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,51	0,49	0,57	0,42	0,52	0,10	0,23	0,77
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,52	0,48	0,55	0,43	0,18	0,07	0,31	0,68
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,50	0,50	0,55	0,45	0,61	0,25	0,10	0,90
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,46	0,54	0,52	0,48	0,40	0,17	0,14	0,86
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	0,48	0,52	0,49	0,51	0,60	0,35	0,07	0,93
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	0,44	0,56	0,47	0,53	0,54	0,28	0,09	0,91
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,46	0,54	0,53	0,47	0,16	0,05	0,29	0,71
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,55	0,45	0,61	0,39	0,85	0,14	0,11	0,89
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,39	0,61	0,46	0,54	0,35	0,15	0,17	0,83
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,50	0,50	0,55	0,45	0,69	0,28	0,04	0,96
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	0,38	0,62	0,45	0,55	0,50	0,25	0,12	0,88
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	0,48	0,52	0,53	0,47	0,62	0,37	0,02	0,99
Durchschnitt	0,51	0,49	0,54	0,46	0,54	0,19	0,20	0,80

Tab. 4-24: DTSP Testauswertung - Wie oft war die Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden besser?

	Wie oft war das Verfahren für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden identisch?	Wie oft war das Verfahren für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden identisch?
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	191	226
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	203	228
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	193	238
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	192	221
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	192	227
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	161	192
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	174	275
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	126	215
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	197	230
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	101	157
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	224	239
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	99	118
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	74	190
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	166	202
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	32	118
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	225	229
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	23	31
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	299	296
Durchschnitt	160	202

Tab. 4-25: DTSP Testauswertung - Wie oft war das Verfahren für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden bzw. über alle dynamischen Kunden identisch?

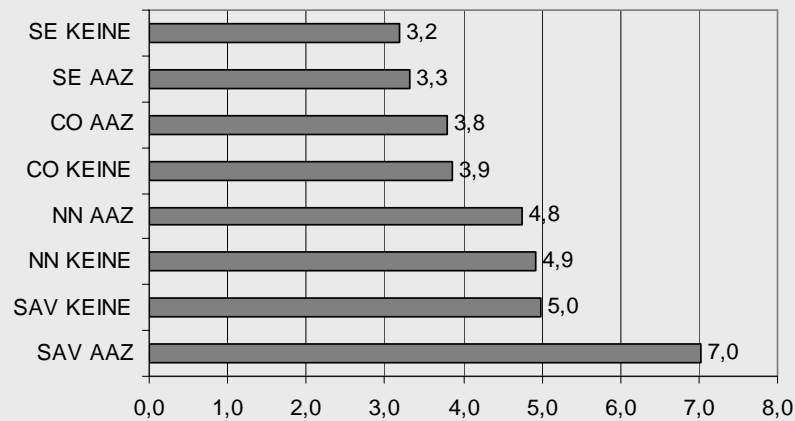
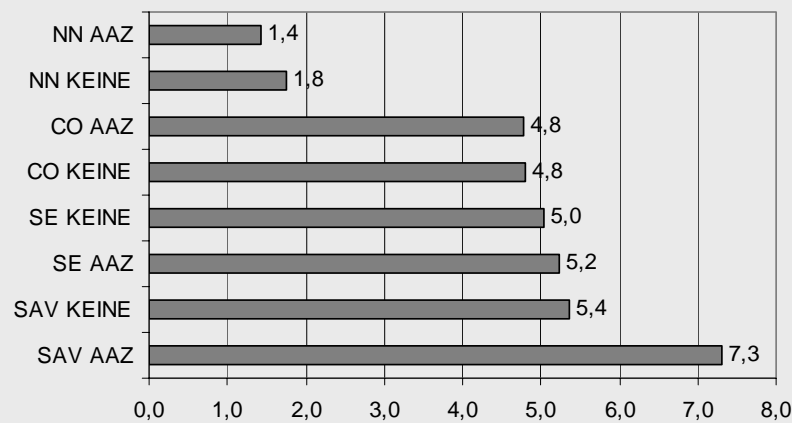
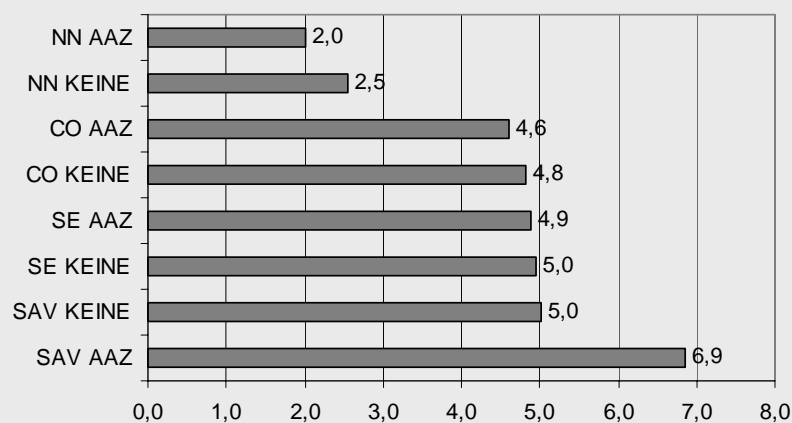
Durchschnittlicher Rang der Verfahren über alle Testläufe bei Zielkriterium *Tourlänge***Durchschnittlicher Rang der Verfahren über alle Testläufe
bei Zielkriterium *durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden*****Durchschnittlicher Rang der Verfahren über alle Testläufe
bei Zielkriterium *durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden***

Abb. 4-33: Durchschnittliche Ränge der Verfahren über alle Testläufe

Die in den Tabellen dargestellten Ergebnisse hängen stark von der gewählten Parameterkombination als auch von dem untersuchten Sachverhalt ab. Abbildung 4-33 zeigt zusam-

menfassend das durchschnittliche Abschneiden der vier Verfahren (modifizierte Sukzessive Einbeziehung, modifiziertes Verfahren von Christofides, modifizierter Bester Nachfolger und modifiziertes Savingsverfahren) einschließlich der zwei Varianten (*Änderung aktueller Zug möglich* vs. *Änderung aktueller Zug nicht möglich*) über alle Testläufe für alle drei Zielkriterien. Bei der Tourlänge ist die modifizierte Sukzessive Einbeziehung mit einem durchschnittlichen Rang von 3,2 bei der Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* und mit einem durchschnittlichen Rang von 3,3 bei der Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* das im Durchschnitt beste Verfahren. Danach folgt das modifizierte Verfahren von Christofides, wobei auch hier nur geringe Unterschiede zwischen beiden Verfahrensvarianten vorliegen. Bei der durchschnittlichen Wartezeit über alle Kunden erzielt im Durchschnitt der modifizierte Beste Nachfolger mit Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* mit einem durchschnittlichen Rang von 1,4 das beste Ergebnis. Auf dem zweiten Platz liegt der modifizierte Beste Nachfolger mit Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* mit einem durchschnittlichen Rang von 1,8. Auch bei der durchschnittlichen Wartezeit der dynamischen Kunden belegt der modifizierte Beste Nachfolger mit Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* den ersten Platz mit einem durchschnittlichen Rang von 2,0 vor seinem Konträr dem modifizierten Besten Nachfolger mit Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* mit einem durchschnittlichen Rang von 2,5. Bei den Zielkriterien durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden (vgl. Tabelle 4-19 und 4-22) ist zu sehen, dass das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger mit Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* je Testlauf immer besser abschneidet als das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger mit Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich*. Wie in Kapitel 4.4 zum Zielkonflikt zwischen Tourlängenminimierung und Wartezeitminimierung dargestellt, schneidet ein kurzsichtiger Algorithmus, der auch noch die Möglichkeit besitzt kurzfristig den aktuellen Fahrzeugzug zu ändern, offensichtlich besser in Bezug auf Zielkriterien zur Wartezeitoptimierung ab. Kurzsichtige Algorithmen wie bester bzw. kürzester Nachfolger bedienen vor allem anfänglich so schnell wie möglich viele Kunden, ohne dabei einen eventuell entstehenden langen Rückweg vom letzten Kunden zum Depot zu berücksichtigen bzw. zu minimieren.

Da die Operations- bzw. Liefergebietsgröße und der Auftragseingangszeitraum ebenfalls Einfluss auf das Abschneiden der Verfahren nehmen und die zwei Parameter noch nicht so detailliert untersucht wurden, stellt die folgende Tabelle Ergebnisse zu weiteren Testläufen dar. Hier erfolgte immer nur die Variation eines dieser zwei Parameter unter Beibehaltung der Anzahl der Gesamtkunden und dynamischen Kunden sowie des anderen Parameters.

Insbesondere soll die Vorteilhaftigkeit einer der beiden Varianten *Änderung aktueller Zug möglich* bzw. *Änderung aktueller Zug nicht möglich* untersucht werden.

Welchen durchschnittlichen Rang hat jedes Verfahren in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge erreicht? (nur Variation Auftragseingangszeitraum und Operationsgebietsgröße)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 25 dyn., AEZ 2 h, 100x100km	2,30	2,46	4,52	4,12	5,75	5,79	5,91	4,60
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,85	2,97	4,23	4,24	5,29	5,45	6,03	4,53
50 GK, 25 dyn., AEZ 6 h, 100x100km	3,08	3,28	4,21	4,29	4,93	5,17	6,24	4,54
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,51	3,62	4,16	4,14	4,68	5,03	6,32	4,33
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 10x10km	3,71	4,18	4,21	4,34	4,38	5,18	5,42	4,58
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	3,63	4,04	4,07	4,45	4,39	5,09	5,68	4,65
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 50x50km	3,49	4,00	3,82	4,49	4,43	5,38	5,82	4,54
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,51	3,62	4,16	4,14	4,68	5,03	6,32	4,33
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 10x10km	3,59	4,58	4,05	4,48	4,52	4,89	5,37	4,52
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,48	4,28	3,96	4,66	4,58	5,19	5,27	4,59
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 50x50km	3,47	3,59	4,13	4,13	4,69	4,97	6,37	4,44
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,85	2,97	4,23	4,24	5,29	5,45	6,03	4,53

Tab. 4-26: DTSP Testauswertung - Variation Auftragseingangszeitraum und Operationsgebietsgröße

In Tabelle 4-26 ist anhand der ersten vier Testläufe zu erkennen, dass bei den Verfahren, mit Ausnahme des modifizierten Savingsverfahrens, keine signifikanten Unterschiede bei den durchschnittlichen Rängen zwischen den Varianten *Änderung aktueller Zug möglich* bzw. *Änderung aktueller Zug nicht möglich* auftreten, wenn nur die Länge des Auftragseingangszeitraumes variiert wird. Beim modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung und beim modifizierten Verfahren Bester Nachfolger ist die Variante *Änderung aktueller Zug möglich* in Bezug auf den durchschnittlichen Rang bei jedem Testlauf geringfügig besser, während beim modifizierten Savingsverfahren die Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* immer einen besseren durchschnittlichen Rang je Testlauf als die Variante *Änderung aktueller Zug möglich* erzielt.

Erfolgt die Betrachtung der letzten acht Testläufe in Tabelle 4-26, bei denen nur die Operationsgebietsgröße variiert wurde (einmal bei Auftragseingangszeitraum 4 h und einmal bei Auftragseingangszeitraum 8 h), zeigt sich für die modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung, Bester Nachfolger und Christofides, dass vor allem bei einem kleinen Operationsgebiet die Verfahrensvarianten mit *Änderung aktueller Zug möglich* deutlich bessere durchschnittliche Ränge erzielen, als die Verfahrensvarianten *Änderung aktueller Zug nicht möglich*. Bei einem größeren Operationsgebiet ist hingegen kaum ein Unterschied zwischen

beiden Verfahrensvarianten festzustellen. Beim modifizierten Savingsverfahren schneidet die Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* bei jedem Testlauf besser ab.

Die Tabellen zu den Auswertungen durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen den Lösungen der zwei Varianten (*Änderung des aktuellen Zuges möglich/nicht möglich*) und durchschnittliche Tourlänge über alle Beispiele des Testlaufes befinden sich im Anhang A1, Tabellen A1-1 bis A1-4. Abbildung 4-34 zeigt die Entwicklung der Tourlänge bei steigendem Grad der Dynamik für die Verfahren zum DTSP für ein Beispiel mit Gesamtkundenanzahl von 50. Bei den Berechnungen zu Abbildung 4-34 wurde lediglich die Anzahl der dynamischen Kunden variiert (in Intervallen von 5),⁴²¹ alle anderen Größen blieben unverändert (Gesamtkundenanzahl 50, Operationsgebietsgröße 100 km x 100 km, Auftragseingangszeitraum 4 h, Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h). Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Grad der Dynamik die Tourlänge zunimmt.

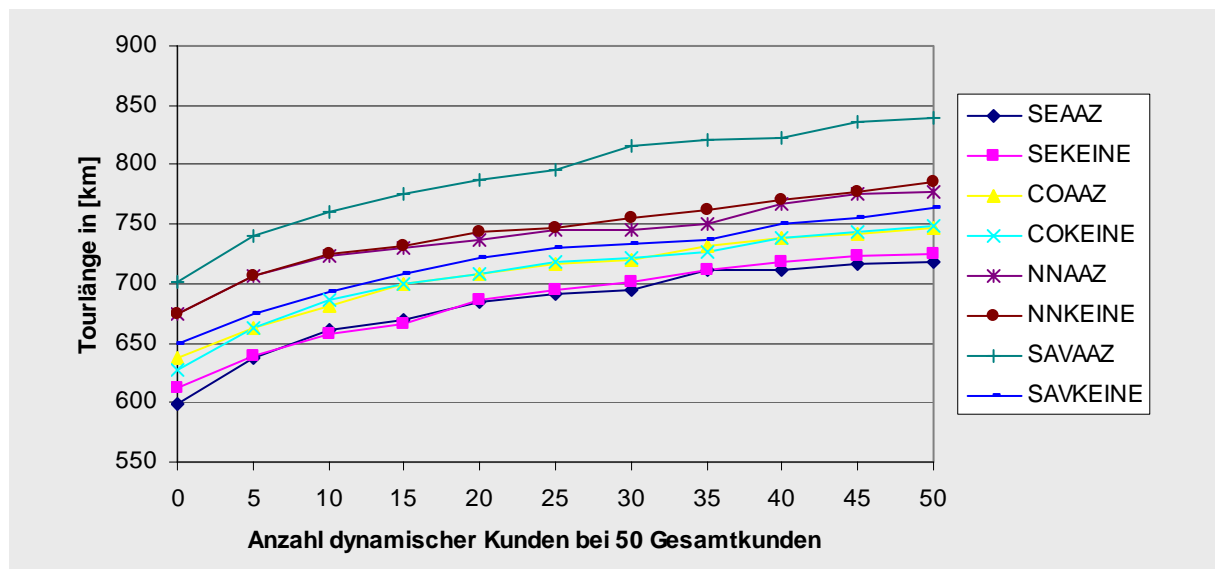


Abb. 4-34: Entwicklung der Tourlänge bei steigendem Grad der Dynamik (DTSP-Verfahren)

Ferner enthält Anhang A2 ein Beispiel zum DTSP mit 30 Kunden, das bei LARSEN abgedruckt ist.⁴²² Dieses Beispiel stellt eines der wenigen dar, die in der Literatur für die in dieser Arbeit betrachtete Problemstellung gefunden wurden. Es erfolgte ein Vergleich des von LARSEN auf dieses Beispiel angewendeten Verfahrens Bester Nachfolger, bei dem keine Möglichkeit besteht den aktuellen Fahrzeugzug zu ändern, mit den in dieser Arbeit entwickelten Verfahren. Anzumerken ist, dass dieses Beispiel als Besonderheit Standzeiten bei den Kunden berücksichtigt. Von den im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Verfahren

⁴²¹ Je Intervall, d. h. je Anzahl dynamischer Kunden, erfolgte die Simulation von 200 Beispielen anhand derer die durchschnittliche Tourlänge bestimmt wurde.

⁴²² Vgl. Larsen, A. (2001), S. 159 (Appendix B).

erzielen das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung und das modifizierte Verfahren von Christofides sowohl bei der Verfahrensvariante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* als auch bei der Verfahrensvarianten *Änderung aktueller Zug möglich* bessere Ergebnisse als das Verfahren Bester Nachfolger bei *Änderung aktueller Zug nicht möglich*.

Die folgenden Tabellen (Tab. 4-27 bis 4-30) zeigen die Ergebnisse der Auswertungen zum DVRP unter Verwendung des modifizierten Savingsverfahrens für das DVRP mit den Varianten *Änderung aktueller Zug möglich* bzw. *Änderung aktueller Zug nicht möglich*.

Tourlänge	Wie oft war jedes Verfahren am besten?		Durchschnittliche Gesamtfahrstrecke [in km]		Größe des Unterschiedes zwischen beiden Verfahren	
	SAV AAZ	SAV KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	642	358	217,19	216,90	4,9 %	6,3 %
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	627	373	955,30	967,22	5,3 %	3,0 %
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	505	495	241,64	244,61	5,0 %	4,5 %
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	542	458	1022,77	1042,73	4,9 %	4,1 %
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	460	540	245,04	248,48	5,2 %	5,4 %
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	601	399	1001,35	1009,79	6,0 %	5,3 %
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	545	455	369,69	362,64	3,8 %	2,4 %
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	559	441	1773,63	1784,92	3,8 %	2,7 %
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	452	548	389,61	391,38	2,9 %	4,3 %
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	577	423	1928,71	1940,74	4,7 %	3,0 %
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	388	612	408,22	399,82	3,3 %	5,2 %
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	494	506	1957,47	1961,46	4,4 %	5,1 %
Durchschnitt	533	467			4,6 %	4,3 %

Tab. 4-27: DVRP Testauswertung - Tourlänge

Durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden	Wie oft war jedes Verfahren am besten?		Durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden [in h]		Größe des Unterschiedes zwischen beiden Verfahren	
	SAV AAZ	SAV KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	263	737	1,365	1,343	3,1 %	3,4 %
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	498	502	2,702	2,690	4,4 %	5,5 %
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	352	648	1,320	1,279	4,5 %	7,7 %
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	390	610	2,731	2,664	5,6 %	7,9 %
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	344	656	1,322	1,268	6,0 %	8,9 %
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	354	646	2,689	2,621	6,6 %	8,1 %
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	316	684	1,384	1,348	2,7 %	4,2 %
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	421	579	2,576	2,542	3,1 %	4,5 %
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	389	611	1,340	1,326	3,8 %	4,9 %
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	457	543	2,603	2,564	4,5 %	6,5 %
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	373	627	1,308	1,273	5,1 %	6,7 %
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	346	654	2,623	2,517	4,6 %	7,5 %
Durchschnitt	375	625			4,5 %	6,3 %

Tab. 4-28: DVRP Testauswertung - Durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden

Durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden	Wie oft war jedes Verfahren am besten?		Durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden [in h]		Größe des Unterschiedes zwischen beiden Verfahren	
	SAV AAZ	SAV KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	376	624	0,929	0,873	12,4 %	17,8 %
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	642	358	2,011	2,110	18,1 %	15,4 %
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	477	523	1,112	1,092	12,7 %	13,5 %
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	551	449	2,287	2,358	15,6 %	11,3 %
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	409	591	1,219	1,186	8,7 %	11,5 %
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	470	530	2,503	2,494	9,5 %	7,3 %
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	438	562	1,004	0,978	16,6 %	16,1 %
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	569	431	2,138	2,192	17,5 %	13,5 %
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	564	436	1,146	1,135	9,3 %	11,8 %
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	622	378	2,228	2,277	10,2 %	8,7 %
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	425	575	1,244	1,210	5,4 %	8,4 %
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	473	527	2,410	2,383	7,6 %	7,8 %
Durchschnitt	501	499			12,2 %	12,0 %

Tab. 4-29: DVRP Testauswertung - Durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden

	Wie oft war die Variante für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden identisch?	Wie oft war die Variante für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden identisch?
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	424	542
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	563	539
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	483	472
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	514	508
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	545	467
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	569	573
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	427	422
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	501	483
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	570	552
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	534	462
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	566	513
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	554	604
Durchschnitt	521	511

Tab. 4-30: DVRP Testauswertung - Wie oft war das Verfahren für kürzeste Tourlänge und geringste durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden bzw. über alle dynamischen Kunden identisch?

Erfolgt eine Bestimmung des Durchschnitts über alle Testläufe in Bezug darauf, wie oft jedes Verfahren am besten war, ergeben sich nur geringe Unterschiede bei den Zielkriterien Tourlänge und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden. Bei der Tourlänge war die Variante *Änderung des aktuellen Zuges möglich* in Bezug auf die Vorteilhaftigkeit absolut gesehen leicht besser. Wird der Durchschnitt über alle 12 Testläufe gebildet, ergibt sich ein Verhältnis von 533 zu 467 in Bezug auf die absolute Vorteilhaftigkeit (vgl. Tab. 4-27). Erfolgt eine Analyse der tatsächlichen relativen prozentualen Abweichung zwischen beiden Vari-

ten, zeigt sich, dass bei den Beispielen, bei denen die Variante *Änderung aktueller Zug möglich* ein besseres Ergebnis erzielt hat als die Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich*, das Ergebnis der Variante *Änderung aktueller Zug möglich* im Durchschnitt um 4,6 % besser war. Im umgekehrten Fall, d. h. die Beispiele, bei denen die Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* ein besseres Ergebnis erzielt hat als die Variante *Änderung aktueller Zug möglich*, sind die Ergebnisse der Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* im Durchschnitt um 4,3 % besser als die der Variante *Änderung aktueller Zug möglich*.⁴²³ In Bezug auf die Tourlänge (vgl. Tab. 4-27) ist festzustellen, dass die Variante *Änderung aktueller Zug möglich* bei dem großen Operationsgebiet (100 km x 100 km) besser abschneidet, mit Ausnahme des letzten Testlaufes (100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km). Bei dem Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden (vgl. Tab. 4-29) schneiden beide Verfahrensvarianten nahezu gleich gut ab. In Bezug auf die absolute Vorteilhaftigkeit ergibt sich ein Verhältnis von 501 zu 499 zu Gunsten der Variante *Änderung aktueller Zug möglich* und in Bezug auf die durchschnittliche relative prozentuale Abweichung zwischen beiden Varianten ein Ergebnis von 12,2 % für die Beispiele, bei denen die Variante *Änderung aktueller Zug möglich* besser ist, und 12,0 % für die Beispiele, bei denen die Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich* besser ist. Für das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden (vgl. Tab. 4-28) ergibt sich ein Verhältnis von 375 zu 625 in Bezug auf die absolute Vorteilhaftigkeit zu Gunsten der Variante *Änderung aktueller Zug verboten*. Bei der relativen Abweichung schneidet ebenfalls die Variante *Änderung aktueller Zug verboten* besser ab, wobei der Unterschied gering ist (4,5 % zu 6,4 %).

Verbesserungen in Bezug auf die Vorteilhaftigkeit der Variante *Änderung des aktuellen Zuges möglich* können aus Sicht des Autors durch die Kombination des hier vorgestellten modifizierten Savingsverfahrens für die dynamische Tourenplanung mit einem Verbesserungsverfahren erzielt werden. Denkbar wäre dabei der Einsatz von Metaheuristiken wie Tabu Search.

Ein weiteres Ergebnis, dass während der Entwicklung des Verfahrens und der Durchführung der Softwaretests ermittelt wurde, ist der Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Wartezeit der Kunden und der Minimierung der Tourlänge.⁴²⁴ Wie in Tabelle 4-30 gezeigt, weist nicht notwendigerweise das Verfahren, das die kürzeste Tourlänge bzw. den Tourenplan mit geringster Länge generiert, auch die im Durchschnitt kürzesten Wartezeiten bei den Kunden auf.

⁴²³ Zu diesen Analysen wurden die gewichteten Durchschnitte über alle entsprechenden Werte in der Tabelle gebildet.

⁴²⁴ Vgl. Kapitel 4.4.

4.5.3 Umsetzungshinweise

Die Rechenzeit der hier vorgestellten Heuristiken zum DTSP oder DVRP bei 100 Kunden beträgt wenige Sekundenbruchteile bzw. Sekunden. Wichtig ist die Zeit zwischen der Abfrage des GPS-Signals bzgl. des Fahrzeugstandortes und dem Vorliegen des durch das Rechenprogramm (Algorithmus) erzeugten Planungsergebnisses, da während der Planung das Fahrzeug seine Position verändert. Da die Planungszeit im Sekundebereich liegt, ist die Abweichung jedoch nur marginal. Ein eventuell länger dauerndes Eingeben der Kundendaten spielt hierbei keine Rolle, da die Abfrage des momentanen Fahrzeugstandortes erst nach der Eingabe der neuen Kundendaten erfolgen sollte.

In dieser Arbeit wurde aus Vereinfachungsgründen eine vollständige Datenmatrix durch die Bestimmung der euklidischen Distanzen zwischen allen Kunden erzeugt. In der Praxis, wo ein gegebenes Straßennetz die Planungsgrundlage darstellt, müsste durch kürzeste Wegealgorithmen⁴²⁵ eine vollständige Datenmatrix bestimmt werden. Das Ergebnis bei Verwendung eines Straßennetzes wird i. d. R. schlechter sein, da es sich hier um die tatsächlichen Entfernungen handelt und nicht die Luftlinienentfernung, wie sie durch die euklidische Distanz bestimmt wird. Gegebenenfalls ist in einem Straßennetz ein sofortiges Abbiegen nicht möglich. Da in Industrienationen, wie Deutschland, die Infrastruktur sehr gut ausgebaut ist, macht es aber dennoch Sinn, die Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges in ein Verfahren zu implementieren. Um den Aufwand innerhalb der Arbeit zu begrenzen, wurde die Bestimmung von kürzesten Wegen in Straßennetzen nicht weiter betrachtet, da für die Funktionsweise der vorgestellten Verfahren nur wichtig ist, dass eine vollständige Datenmatrix vorliegt.

Mögliche Batching-Strategien⁴²⁶, wie bei LARSEN beschrieben, können mit den vorgestellten Verfahren ebenfalls umgesetzt werden, da die Verfahren immer die aktuelle Datenbasis berücksichtigen, die durchaus auch mehrere neue dynamische Kunden umfassen kann.⁴²⁷ Nachteilig ist bei der Anwendung von Batching-Strategien, dass nicht sofort Rücksprache mit dem dynamischen Kunden gehalten werden kann, ob eine Integration des Kunden in den Tourenplan möglich ist. Wird die in dieser Arbeit betrachtete Problemstellung um Kundenzeitfenster oder durch eine Beschränkung des Fuhrparks erweitert, kann es durchaus Fälle geben, bei denen eine Integration eines neuen dynamischen Kunden in den bestehenden Tourenplan nicht möglich ist. Erfolgt die Anwendung der Single Event Optimization Strategie, kann unmittelbar bei Anruf bzw. Eingang eines dynamischen Kunden die Tourenplanung

⁴²⁵ Z. B. Tripelalgorithmus nach Floyd. Vgl. Neumann, K./ Morlock, M. (2002), S. 219 ff.

⁴²⁶ Hierbei handelt es sich um die mengen- oder zeitmäßige Zusammenfassung von dynamischen Kunden.

⁴²⁷ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 87. Larsen stellte außerdem keine Verbesserungen fest, wenn die Anwendung von Batching-Strategien erfolgt.

ausgeführt werden, und daraufhin dem Kunden eine Bestätigung seines Auftrages gegeben oder eine sofortige Lösung des aufgetretenen Problems, z. B. bei zu engen Kundenzeitfens-terschränken, angestrebt werden. Bei der Verwendung von Batching-Strategien liegt das Planungsergebnis erst zeitversetzt vor, sodass bei eventuellen Problemen ein Rückruf zum Kunden notwendig ist. Zudem erfährt der Kunde erst zeitverzögert, dass seinem Leistungs-wunsch nicht entsprochen werden kann.

Eine weitere Problematik ist die Festlegung des Arbeitstages. Dies kann der Disponent aufgrund seiner Erfahrungswerte selbst bestimmen, indem er die ab einer bestimmten Uhr-zeit (z. B. 15:00 Uhr) eingehenden Kunden als statische Kunden für den Folgetag sammelt. Bei einer sehr stark automatisierten Planung wäre auch denkbar, dass das Planungssystem diese Aufgabe übernimmt, indem es selbstständig prüft, ob die Aufnahme eines weiteren dynamischen Kunden in den Tourenplan eine Überschreitung der spätesten möglichen An-kunftszeit der Fahrzeuge am Depot zur Folge hat.

Um die Performance der vorgestellten neu entwickelten Heuristiken zu verbessern, wäre es möglich auf jedes Teilproblem sowohl die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Zuges möglich* als auch die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich* anzu-wenden und in jedem Teilproblem die bessere Alternative auszuwählen. Allerdings kann auch dann der Zufall, dem die neu eingehenden dynamischen Kunden unterliegen, eine bessere Performance verhindern.

Die hier in der Arbeit beschriebenen Verfahren (bzw. Heuristiken) zum DTSP und DVRP können zur Erzeugung einer Startlösung innerhalb weniger Sekunden verwendet werden. Durch diese schnelle Generierung der Startlösung ist es möglich, schon wenige Sekunden nach dem Auftreten eines dynamischen Kunden neue Tour- bzw. Routenvorschläge, die eventuell eine Änderung des momentan angesteuerten Ziels beinhalten, an die Fahrzeuge zu übertragen. Der Teil der Routen, der erst später für die Fahrzeuge relevant ist, kann im Anschluss an die Erzeugung der Startlösung ohne Zeitdruck durch die Verbesserungsverfahren, die u. U. mehrere Minuten benötigen, optimiert werden. Hierbei ist ein Einsatz klassi-scher Verbesserungsverfahren und neuerer Verbesserungsverfahren auf Basis von Meta-heuristiken wie Tabu Search denkbar.⁴²⁸ Da nicht permanent neue dynamische Kunden eingehen, sind die Computer bei der dynamischen Tourenplanung i. d. R. nicht ständig mit der Planung einzelner Teilprobleme beschäftigt. Die zur Verfügung stehenden Freiräume, in denen die Rechenkapazität nicht voll beansprucht wird, können zur Verbesserung der ge-plannten Ergebnisse genutzt werden.

⁴²⁸ Vgl. Kapitel 2.7.3.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Unternehmen der Transportbranche müssen gerade im operativen Tagesgeschäft bei der Tourenplanung und Transportdisposition Planungsprobleme lösen, die ein hohes Maß an Dynamik aufweisen. Speziell die Inputfaktoren der Tourenplanung sind größtenteils dynamisch und stochastisch. Vor allem die Entwicklungen der letzten Jahre, wie gestiegene Leistungs- und Qualitätsansprüche der Verladerschaft und deren Kunden, das starke Wachstum des Verkehrs, die Veränderung der Art der beförderten Güter und die Anwendung neuerer logistischer Konzepte wie Just-in-time, haben zur Folge, dass die Planungsprobleme diese Charakteristik besitzen. War vor wenigen Jahren noch die Anwendung einer statischen Tourenplanung ausreichend, bei der während der Ausführung der Planungsergebnisse höchstens manuell kleine Veränderungen der Touren durchgeführt wurden, so ist heutzutage vor dem Hintergrund der veränderten Rahmenbedingungen der Einsatz einer dynamischen Tourenplanung empfehlenswert. Zum einen kann dadurch die dem Kunden angebotene Leistung bzw. der Servicegrad verbessert werden, zum anderen kann auch die Optimierung der eigenen Kosten erfolgen, da real-time zu den bekannt werdenden Inputinformationen ein Update der Planung möglich ist. In einer Branche, in der der Wettbewerbsdruck ständig zunimmt, stellt die Durchführung einer dynamischen Tourenplanung nicht zuletzt auch ein entscheidendes Wettbewerbskriterium dar. Allerdings sehen sich die Planer in der betrieblichen Praxis hierbei Planungsproblemen gegenüber, mit denen sich die Wissenschaft bisher nur wenig beschäftigt hat, wie in der Arbeit erörtert wurde.

Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Auseinandersetzung mit der dynamischen Tourenplanung. Dabei galt es, das Themengebiet der dynamischen Tourenplanung sowohl theoretisch als auch aus praktischer Sicht zu analysieren, um eine ganzheitliche Darstellung dieses noch relativ jungen Forschungsgebietes zu ermöglichen. Um die möglichst ganzheitliche Betrachtung des Themengebietes zu gewährleisten, war es notwendig, die wenige zu diesem Themengebiet vorhandene Literatur aufzuarbeiten, zu systematisieren und inhaltlich zu ergänzen. Dies beinhaltete zum einen die Erläuterung von Grundlagen, wie Definitionen, Literaturüberblick, Anwendungsgebiete sowie wesentliche Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung und zum anderen die Vorstellung von bereits vorhandenen Lösungskonzepten. Dabei erfolgte sowohl die Erörterung von quantitativen als auch von qualitativen Aspekten der dynamischen Tourenplanung. Dem geeigneten Leser sollten somit vor der Präsentation von quantitativen Verfahren zur dynamischen Tourenplanung allgemein geltende Grundsätze übermittelt werden, da vor allem im deutschsprachigen Raum kaum Literatur, zur dynamischen Tourenplanung vorhanden ist. Zudem sind zur erfolgreichen nachhaltigen Umsetzung von quantitativen Verfahren in der Praxis entsprechende begleiten-

de qualitative Regeln notwendig. Daher war es das Ziel, ein Gesamtkonzept zu präsentieren. Dies beinhaltet dementsprechend auch die Analyse von Schnittstellen zwischen der dynamischen Tourenplanung und eng damit verbundenen Bereichen wie Flottenmanagement oder Auftragseingang bzw. -disposition. Hierzu wurden die Informationsflüsse zwischen den beteiligten Elementen im Rahmen des dynamischen Dispositionsprozesses aufgezeigt, telematische Komponenten zur Unterstützung des Informationsmanagements und der Informationsübertragung vorgestellt sowie die benötigten Inputdaten erläutert. Den Schwerpunkt der Arbeit stellte jedoch die Entwicklung von neuen quantitativen Methoden zur dynamischen Tourenplanung dar.

Aus den Zielstellungen ergab sich folgender Inhalt der Arbeit, dessen Zusammenfassung kurz erfolgt. Zugleich werden die wichtigsten Erkenntnisse herausgestellt.

Anhand der am Anfang der Arbeit durchgeführten Analyse der Bedeutung und Entwicklung des Straßengüterverkehrs zeigte sich, dass gerade der Straßengüterverkehr aufgrund seiner Systemvorteile und der daraus resultierenden Haupteinsatzfelder besonders stark am Transport derjenigen Güterarten partizipiert, die für eine dynamische Tourenplanung relevant sind. Infolgedessen fand die Betrachtung der dynamischen Tourenplanung für den Straßengüterverkehr statt. Des Weiteren wurden eingangs Grundlagen der Tourenplanung sowie speziell die statische Tourenplanung behandelt. Insbesondere umfasste das die Einordnung der Tourenplanung in die betriebswirtschaftliche Logistik, die Beschreibung der Problemstellung und Zielstellungen der Tourenplanung, die Analyse der Komplexität sowie die Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen. Ferner erfolgte kurz die Betrachtung des Softwareeinsatzes zur Tourenplanung, da im Rahmen der Arbeit Softwareprogramme zum Test der eigenen entwickelten Algorithmen geschrieben wurden, die später einmal in kommerzielle Softwareprodukte leicht zu integrieren sein und nach Möglichkeit bestehende Schwächen bisheriger Lösungen beseitigen sollen. Ein weiterer Hauptpunkt war die Darstellung von Modellen und Verfahren zur statischen Tourenplanung, da sie der Ausgangspunkt für die erfolgte Neuentwicklung von Verfahren sind. Verfahren zur Rundreisplanung wurden ebenfalls präsentiert, da die Rundreisplanung ein Spezialfall der Tourenplanung ist und die Lösung von Rundreisproblemen Teilaufgabe bei der Tourenplanung sein kann.

In der Arbeit erfolgte die ausführliche Betrachtung der dynamischen Tourenplanung. Dies beinhaltete die Vorstellung verschiedener Definitionsansätze zur dynamischen Tourenplanung, eine ausgewählte Darstellung bisheriger Arbeiten zu diesem Thema, die Abgrenzung von statischer und dynamischer Tourenplanung anhand ausgewählter Thesen und eine Nennung von Anwendungsgebieten, in denen die Durchführung einer dynamischen Touren-

planung sehr bedeutend ist. Bei den Definitionsansätzen wurde nach der Planungszeitpunktbezogenen und der Inputdaten-bezogenen Definition unterschieden. Des Weiteren musste festgestellt werden, dass eine klar getrennte Definition nach den Begriffen statisch, dynamisch, deterministisch und stochastisch nur schwer möglich ist, da sich die ersten beiden und die letzten beiden Begriffe untereinander ausschließen, aber bei einer Kombination der Begriffe eine strikte Trennung nicht mehr möglich ist. Die Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Tourenplanung anhand der Thesen von PSARAFTIS (1988) wurde um die Aspekte Nutzenanalyse und Art der Aufgabe ergänzt. Speziell die Beachtung der These Art der Aufgabe ist nicht zu vernachlässigen, da sie die Komplexität der Planung entscheidend beeinflusst. Die bedeutendsten Anwendungsgebiete, für die sich die neu entwickelten Verfahren eignen, sind das dynamische Flottenmanagement bei Transportunternehmen und Expeditionen, lieferantengesteuerte Lagersysteme sowie die Tourenplanung und Disposition bei KEP-Diensten und bei Pannen- und Reparaturdiensten. Allerdings ist zu ergänzen, dass ein Einsatz der neu entwickelten Verfahren nur für die Lösung von Problemen, bei denen das Einsammeln von Gütern oder das Ausliefern von homogenen Gütern (z. B. Heizöl) stattfindet, möglich ist. Die dynamische Tourenplanung für das Ausliefern eines heterogenen Güterspektrums, bei dem bei Auftritt eines dynamischen Kunden das Fahrzeug i. d. R. zwischenzeitlich das Depot aufsuchen müsste, um die durch den dynamischen Kunden geforderte Ware aufzunehmen, war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ein weiterer Anwendungsbereich besteht in der dynamischen Planung von Monteurstouren, da hierbei keine zusätzlichen Güter im Voraus mitgenommen werden müssen. Ferner wurden die wichtigsten bisher in der Literatur erschienen Lösungskonzepte erläutert. Hierbei kann zwischen a priori und real-time Methoden unterschieden werden. Bei den in dieser Arbeit vorgestellten aus der Literatur bekannten Verfahren konnte bei allen, mit Ausnahme eines, festgestellt werden, dass eine Änderung des aktuellen Zuges nicht möglich ist. Bei diesem einen Verfahren werden allerdings keine Bedarfe und Kapazitäten berücksichtigt. Ferner ist zu ergänzen, dass sich die in dieser Arbeit neu vorgestellten Verfahren durch Einfachheit und sehr gute Nachvollziehbarkeit auszeichnen, im Gegensatz zu den meisten anderen aus der Literatur bekannten real-time Methoden, z. B. Metaheuristiken, die deutlich komplexer und dementsprechend für den Disponent bzw. Planer schwieriger nachvollziehbar sowie rechenzeitintensiver sind. Die Erläuterung des Grades der Dynamik, eine bedeutende Kennzahl zur Beschreibung der Dynamik eines Systems, fand ebenfalls statt. Die Erörterung von technischen Komponenten war ebenso Gegenstand der Arbeit, mit dem Ziel eine nachhaltige Umsetzung der dynamischen Tourenplanung in der Praxis zu gewährleisten. Hier wurde gezeigt, dass nicht nur im Bereich der Transportplanung und -disposition isolierte Verbesserungen durchgeführt werden können, sondern dass auch bei der weitreichenden Integration der Transportobjekte in die betriebliche Informationskette erhebliche Potenziale zur Effizienzverbesserung bestehen,

da in der güterverkehrslogistischen Praxis der Grad der verfahrensbasierten dynamischen Tourenplanung sowie eine technische Unterstützung jener bislang gering ist.

Den bedeutendsten Teil der Arbeit stellte die Vorstellung der neu entwickelten Verfahren dar. Der Untersuchungsbereich wurde auf das kapazitierte dynamische Tourenplanungsproblem beschränkt. Dabei erfolgte nur eine Betrachtung der Dynamik bezüglich der Anzahl der zu bedienenden Kunden. Zuerst wurde das Planungskonzept, welches das dynamische Gesamtproblem löst, beschrieben. Hierbei handelt es sich um eine rollierende Planung, da eine neue Planung immer dann ausgeführt wird, wenn ein neuer dynamischer Kunde auftritt. Jede einzelne auszuführende Planung des gesamten dynamischen Dispositionsprozesses stellt ein Teilproblem dar. Gegenstand der Arbeit war, speziell für die Lösung der Teilprobleme Verfahren zu entwickeln sowie ein mathematisches Modell zu formulieren, das die Teilprobleme beschreibt. Dabei erfolgte sowohl die Betrachtung von Verfahren zur Lösung der Teilprobleme des dynamischen Tourenplanungsproblems als auch von Verfahren zur Lösung der Teilprobleme des dynamischen Traveling Salesman Problems. Die Betrachtung von dynamischen Tourenplanungsproblemstellungen und von dynamischen Traveling Salesman Problemen wurde gewählt, weil zum einen das Traveling Salesman Problem ein Teilproblem des Tourenplanungsproblems ist und zum anderen Algorithmen zur Lösung des Traveling Salesman Problems im Rahmen der Tourenplanung, z. B. bei zweistufigen Verfahren, zum Einsatz kommen können.

Die besondere Schwierigkeit bei der Konzeption der neuen Verfahren stellte die Beachtung der aktuellen geographischen Positionen und Restkapazitäten der Fahrzeuge dar. Da dynamische Kunden dadurch gekennzeichnet sind, dass sie parallel zur Ausführung des Tourenplans erscheinen, befinden sich zum Auftrittszeitpunkt eines dynamischen Kunden einige oder alle Fahrzeuge nicht am Depot, sondern dementsprechend an verschiedenen geographischen Punkten im Operationsgebiet. Ähnliches gilt für die jeweilige momentane Restkapazität eines jeden Fahrzeuges, die in Abhängigkeit der bis zum Auftrittszeitpunkt eines dynamischen Kunden bedienten Kunden durch das betreffende Fahrzeug variiert.

Für das dynamische Traveling Salesman Problem wurden das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung (DTSP), das modifizierte Verfahren von Christofides, das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger und das modifizierte Savingsverfahren (DTSP) entwickelt. Für das dynamische Tourenplanungsproblem erfolgte die Konzeption des modifizierten Savingsverfahrens (DVRP) und von vier Varianten eines modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung (DVRP). Alle neu entwickelten Verfahren besitzen die Eigenschaft, dass der aktuelle Fahrzeugzug geändert werden kann. Lediglich ICHOUA et al. analysierten bis jetzt die Mög-

lichkeit, den aktuellen Fahrzeugzug zu verändern.⁴²⁹ Jedoch bezog sich diese Untersuchung nur auf unkapazitierte Problemstellungen. Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren modifiziertes Savingsverfahren und modifizierte Sukzessive Einbeziehung für das dynamische Tourenplanungsproblem (DVRP) besteht nun auch die Möglichkeit der Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges bei dynamischen kapazitierten Tourenplanungsproblemstellungen. Die neu vorgestellten Verfahren für das dynamische Traveling Salesman Problem zeichnen sich im Gegensatz zu ICHOUA et al.,⁴³⁰ deren Algorithmus auf einer Metaheuristik basiert, durch größtmögliche Verständlichkeit, Einfachheit und sehr kurze Rechenzeiten aus. Allgemein ist ferner noch hervorzuheben, dass sich alle neu entwickelten Verfahren an den Anforderungen der Praxis nach Nachvollziehbarkeit der Planungsalgorithmen und Interaktionsmöglichkeiten ausrichten.

Zudem sind die vorgestellten Verfahren aufgrund ihrer Struktur verständlich und leicht implementierbar, weisen eine Flexibilität gegenüber Erweiterungen für praktische Rahmenbedingungen wie Kundenzeitfenster auf und gewährleisten kurze Rechenzeiten, die durch die kurzen zur Verfügung stehenden Reaktionszeiten seitens des Disponenten gefordert werden. Ferner besitzt das Savingsverfahren einen sehr hohen Bekanntheitsgrad und wird in der Praxis sehr häufig verwendet.

Um die praktische Anwendbarkeit und die Lösungsgüte zu prüfen, erfolgte die Implementierung der neuen Modelle und Verfahren in einer Software. Dadurch mögliche numerische Tests wurden ebenfalls durchgeführt. Die Realisierung in der Software sowie die numerischen Tests zeigen die gute Übertragbarkeit der Methoden und Ergebnisse in die Praxis. Neben der generellen Anwendbarkeit der entwickelten Methoden erfolgte bei den Tests der Vergleich, ob es sinnvoll ist, die Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges zuzulassen, oder ob es besser ist, die Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges zu verbieten. Dazu wurden alle neu entwickelten Verfahren zum einen so implementiert, dass die Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich ist, und zum anderen so, dass die Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich ist. Wird der durchschnittliche Rang, den die Verfahren über alle Testläufe erzielt haben, für das Zielkriterium Tourlänge gebildet, zeigt sich, dass bei den Verfahren zum dynamischen Traveling Salesman Problem bei den durchgeführten Testläufen kaum Unterschiede zwischen den zwei Verfahrensvarianten *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* und *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* auftreten, mit Ausnahme des modifiziertem Savingsverfahren bei dem die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* der Verfahrensvariante *Änderung des*

⁴²⁹ Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 430.

⁴³⁰ Vgl. Ichoua, S. et al. (2000), S. 426 ff.

aktuellen Fahrzeugzuges möglich überlegen ist. Bei den Zielkriterien durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden schneidet beim modifizierten Verfahren Bester Nachfolger die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* signifikant besser ab als die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich*. Bei der modifizierten Sukzessiven Einbeziehung und beim modifizierten Verfahren von Christofides gibt es nur geringfügige Unterschiede zwischen beiden Verfahrensvarianten, während beim modifizierten Savingsverfahren erneut die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* besser abschneidet als die Verfahrensvariante *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich*. Der Vergleich der vier Verfahren für das dynamische Traveling Salesman Problem ergab, dass bei der Minimierung der Tourlänge das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung und das modifizierte Verfahren von Christofides die besten Ergebnisse erzielen, während im Hinblick auf die Minimierung der durchschnittlichen Wartezeit über alle Kunden und der Minimierung der durchschnittlichen Wartezeit der dynamischen Kunden das modifizierte Verfahren Bester Nachfolger am besten abschneidet. Bei den Tests mit dem modifizierten Savingsverfahren für die dynamische Tourenplanung zeigte sich, dass bei den Zielkriterien Tourlänge und durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden das modifizierte Savingsverfahren mit *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich* geringfügig bessere Ergebnisse erzielt als das modifizierte Savingsverfahren mit *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich*, während beim Zielkriterium durchschnittlichen Wartezeit über alle Kunden das modifizierte Savingsverfahren mit *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges nicht möglich* besser ist als das modifizierte Savingsverfahren mit *Änderung des aktuellen Fahrzeugzuges möglich*.

Ein weiteres interessantes Ergebnis, dass sich während der Entwicklung der Verfahren und der Durchführung der Softwaretests zeigte, ist der Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Wartezeit der Kunden und der Minimierung der Tourlänge. Es wurde gezeigt, dass nicht das Verfahren, das die kürzeste Tourlänge bzw. den Tourenplan mit geringster Länge generiert, auch die im Durchschnitt kürzesten Wartezeiten bei den Kunden aufweist.

Neben den bereits vorliegenden Ergebnissen gibt es noch weiteren Forschungsbedarf im Rahmen der dynamischen Rundreise- und Tourenplanung. So ist zu analysieren, in welche Richtung die im ersten Planungslauf (Planung nur für die statischen Kunden) erhaltene Rundreise bei der Rundreiseplanung zu fahren ist bzw. die erhaltenen Touren bei der Tourenplanung zu fahren sind, da es sich um ein symmetrisches Problem handelt, bei dem zunächst die Richtung nicht determiniert ist. Als Frage kann daher aufgeworfen werden, ob der Weg zum ersten Stop möglichst lang oder möglichst kurz sein soll. In Bezug auf die Minimierung der Wartezeit lässt sich vermuten, dass der Weg zum ersten Stop möglichst

kurz sein sollte. Dementsprechend besteht auch weiterer Forschungsbedarf in der Entwicklung von Algorithmen, die Touren so konstruieren, dass speziell die Wartezeit der Kunden minimiert wird, oder die zumindest eine Zielfunktion optimieren, die die Suche nach einem Tourenplan mit minimaler Länge und der Minimierung der Wartezeit vereint.

Eine weitere Fragestellung ist, mit welchen Benchmarks die erhaltenen Ergebnisse verglichen werden können. Dabei gilt es zu beachten, dass die Teilprobleme einer dynamischen Tourenplanung zwar optimal gelöst werden können, dadurch aber nicht zwangsläufig ein optimales Ergebnis für das Gesamtproblem vorliegt. Ob das Gesamtproblem optimal gelöst wurde, kann also nur im Nachhinein analysiert werden. D. h. es ist zu untersuchen, inwieweit für die dynamische Tourenplanung ein besseres Ergebnis erzielt werden könnte, wenn alle Daten sofort zugänglich gewesen wären. Ziel sollte daher die Entwicklung eines Referenzmaßes sein, bei dem mittels ex-post Betrachtung des dynamischen Rundreise- bzw. Tourenplanungsproblems eine exakte Lösung für das dynamische Gesamtproblem gefunden wird. Gelingt diese Entwicklung und können dadurch ex-post exakte Lösungen für das Gesamtproblem ermittelt werden, ist die Generierung von Testinstanzen einschließlich ihrer optimalen Lösung möglich. An diesen Testinstanzen könnten dann neu entwickelte Verfahren, speziell Heuristiken, gemessen werden. Dadurch sind Aussagen möglich, wie weit die gefundene Lösung durch eine Heuristik vom exakten Ergebnis abweicht, d. h. wenn alle zukünftigen Informationen im Vorhinein mit Sicherheit bekannt gewesen wären. Bei der Entwicklung des Referenzmaßes könnte der Versuch erfolgen, die dynamischen Kunden über Zeitfenster abzubilden, wobei das untere Zeitfensterende den Zeitpunkt des Auftragseinganges darstellt und das obere offen ist oder das Ende des Planungszeitraumes symbolisiert.⁴³¹

Ferner ist die Tätigkeit auftragsfreier Fahrzeuge zu bestimmen. Als Alternativen sind denkbar, dass Fahrzeuge beim letzten Kunden auf einen neuen Auftrag warten oder Fahrzeuge nicht beim Kunden warten, sondern zum Depot zurückkehren, um gegebenenfalls neue Ware aufzunehmen oder bereits eingesammelte abzugeben. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass Fahrzeuge einen vorher festgelegten Punkt ansteuern, einen sogenannten "Idlepoint", um dort auf neue Aufträge zu warten.

Welche Verbesserungen sich bei der Lösungsgüte ergeben, wenn neben der Anwendung der neu entwickelten Algorithmen noch Verbesserungsverfahren, wie z. B. Metaheuristiken, eingesetzt werden, ist ebenfalls ein stärker zu erforschender Aspekt. Die Verbesserungsver-

⁴³¹ Anhang A6 enthält zu diesem Konzept zwei Beispiele.

fahren können insbesondere die Zeitspanne zwischen dem Eingang zweier neuer dynamischer Kunden nutzen, da hier die Beanspruchung der Rechnerkapazität gering ist.

Weitere zu betrachtende Aspekte dynamischer Tourenplanung sind die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeiten bezüglich zukünftiger Daten, die Betrachtung im graphentheoretischen Kontext und nicht nur in der euklidischen Ebene sowie der Vergleich von sogenannten globalen Strategien mit den Optimierungsverfahren zur Lösung der Teil- bzw. Unterprobleme, d. h. Ziel sollte die Entwicklung genereller anstatt von "ad-hoc" Strategien sein.⁴³² Zu analysieren wäre, ob das sofortige Neuplanen bei Auftritt eines neuen Kunden (SEO-Strategie) sinnvoll ist, oder ob andere Strategien, die mehrere neue dynamische Kunden sammeln, bevor eine Neuplanung erfolgt, besser abschneiden. In diesem Zusammenhang sind die Unterschiede zwischen lokalen und globalen Verfahren sowie deren Vor- und Nachteile ebenfalls tiefer zu erforschen.

Die Entwicklung von Kennzahlen zur Beschreibung dynamischer Systeme sollte fortgeführt werden. Dabei ist zu analysieren, welche Maßnahmen der Disponent ergreifen kann bzw. welche Einflussmöglichkeiten er hat, um die Dynamik zu senken bzw. besser beherrschbar zu machen.

Die Idee, bei Planungen im dynamischen Gesamtprozess zusätzliche Knoten (Startpunkte) für die aktuellen Fahrzeugpositionen zu verwenden, ist auch für die Anwendung auf Problemstellungen mit dynamischen Fahrzeiten denkbar. Ändert sich die Datenmatrix der Fahrzeiten (z. B. durch Unfall), sind ausgehend von den aktuellen Fahrzeugpositionen die kürzesten Wege von den Startpunkten zum Depot unter der Prämisse, dass alle Aufträge den Fahrzeugen wieder zugeordnet werden, zu planen.

In der vorliegenden Arbeit konnte die Relevanz der dynamischen Tourenplanung herausgestellt werden. Da es bis jetzt wenig Verfahren zur Lösung von dynamischen Tourenplanungsproblemen gibt, erfolgte hierzu die Entwicklung neuer Verfahren. Die positiven Ergebnisse der durchgeführten Tests zeigen die gute Anwendbarkeit und den Nutzen der neuen Verfahren. Mit dieser Arbeit wurde das Spektrum der wissenschaftlichen Untersuchungen im Bereich der dynamischen Tourenplanung um eine erweitert, auf der folgende Arbeiten aufbauen können.

⁴³² Vgl. unter anderem Bianchi, L. (2000), S. 15.

Literaturverzeichnis

Abele, E. (2002): Transportlogistik, Kissing 2002, WEKA Media.

Aberle, G. (2003): Transportwirtschaft, München 2003, Oldenbourg.

Aberle, G. (2005): Zukünftige Entwicklung des Güterverkehrs: Sind Sättigungsgrenzen erkennbar?, in Diskussionsbeiträge Nr. 106, Institut für Verkehrswissenschaft und Regionalpolitik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Ahn, B.-H./ Shin, J.-Y. (1991): Vehicle-routing with time windows and time-varying congestion, in Journal of Operational Research Society 42 (1991), Seite 393-400.

Altinkemer, K./ Gavish, B. (1991): Parallel Savings Based Heuristics for the Delivery Problem, in Operations Research 39 (1991), Seite 456-470.

Andres, M. (2003): Telematiksysteme für die eLogistik, FTK Forschungsinstitut für Telekommunikation, www.elog-center.de/service/downloads/broschueren/telematik_broschuere.pdf (Abgerufen am: 01.01.2004).

Assad, A. A. (1988): Modelling and implementation issues in vehicle routing, in Golden, B./ Assad, A. (1988), Vehicle Routing: Methods and Studies, Amsterdam 1988, North-Holland, Seite 7-46.

Bargl, M. (1994): Akzeptanz und Effizienz computergesteuerter Dispositionssysteme in der Transportwirtschaft, Frankfurt am Main 1994, Peter Lang.

Bauer, H. (2001): Audio, Navigation und Telematik für Kraftfahrzeuge, Stuttgart 2001, Gelbe Reihe Bosch.

Beardwood, J./ Halton, J./ Hammersley, J. (1959): The shortest path through many points, in Proceedings of the Cambridge Philos. Society 55 (1959), Seite 299-327.

Behnke, N. C. (1997): Wirtschaftswachstum, Strukturwandel und Verkehrsentwicklung - Der volkswirtschaftliche Nutzen des Verkehrs, Köln 1997.

Bell, W./ Dalberto, L./ Fisher, M./ Greenfield, A./ Jaikumar, R./ Kedia, P./ Mack, R./ Prutzman, P. (1983): Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling system, in Interfaces 13 (1983), Seite 4-23.

Bertsimas, D./ Howell, L. (1993): Further results on the probabilistic traveling salesman problem, in European Journal of Operational Research 65 (1993), Seite 68-95.

Bertsimas, D./ Simchi-Levi, D. (1996): A new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty, in Operations Research 44 (1996), Seite 286-304.

- Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1991): A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the euclidean plane, in *Operations Research* 39 (1991), Seite 601-615.
- Bertsimas, D./ van Ryzin, G. (1993): Stochastic and dynamic vehicle routing in the euclidean plane with multiple capacitated vehicles, in *Operations Research* 41 (1993), Seite 60-76.
- Bianchi, L. (2000): Notes on dynamic vehicle routing - The State of the Art, Technical Report IDSIA-05-01, 2000, www.idsia.ch/~leo/papers/IDSIA-05-01.pdf (Abgerufen am: 15.06. 2003).
- Bianchi, L./ Knowles, J./ Bowler, N. (2005): Local search for the probabilistic traveling salesman problem: Correction to the 2-p-opt and 1-shift algorithms, in *European Journal of Operational Research* 162 (2005), Seite 206-219.
- Blasum, U. (2000): Anwendung des Branch & Cut Verfahrens auf das kapazitierte Vehicle Routing Problem, Köln 2000.
- Bloech, J./ Ihde, G. (1997): Vahlens Großes Logistik Lexikon, München 1997, Vahlen.
- Bodin, L./ Golden, B. (1981): Classification in vehicle routing and scheduling, in *Networks* 11 (1981), Seite 97-108.
- Bousonville, T. (2002): Tourenplanung für die Siedlungsabfallentsorgung, Wiesbaden 2002, Gabler.
- Buchholz, J./ Clausen, U./ Vastag, A. (1998): Handbuch der Verkehrslogistik, Berlin 1998, Springer.
- Buchholz, J. (1996): Erfassung der verkehrlichen Infrastruktur, in Siegle, G. (1996), *Telematik im Verkehr*, Heidelberg 1996, R. v. Decker, Seite 93-103.
- Bullnheimer, B./ Hartl, R. F./ Strauss, C. (1999): An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem, in *Annals of Operations Research* 89 (1999), Seite 561-581.
- Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (Hrsg.) (2001): Verkehrsprognose 2015, www.bmmbw.de/-713.htm (Abgerufen am: 20.03.2004).
- Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (Hrsg.) (2004): www.bgl-ev.de/index-daten.html (Abgerufen am: 01.06.2004).
- Chmielewicz, K. (1994): *Forschungskonzeptionen der Wirtschaftswissenschaft*, Stuttgart 1994.
- Christofides, N./ Eilon, S. (1972): Algorithms for large-scale traveling salesman problems, in *Operations Research Quarterly* 23 (1972), Seite 511-518.
- Clark, G./ Wright, J.W. (1964): Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, in *Operations Research* 12 (1964), Seite 568-581.

- Clark, J. (1994): Graphentheorie: Grundlagen und Anwendungen, Heidelberg 1994, Spektrum.
- Cordeau, J.-F./ Gendreau, M./ Laporte, G./ Potvin, J./ Semet, F. (2002): A guide to vehicle routing heuristics, in *Journal of the Operational Research Society* 53 (2002), Seite 512-522.
- Crainic, T./ Toulouse, M. (1998): Parallel metaheuristics, in Crainic, T./ Laporte, G. (1998), *Fleet management and logistics*, Boston 1998, Kluwer, Seite 205-251.
- Croes, G.A. (1958): A method for solving traveling salesman problems, in *Operations Research* 6 (1958), Seite 791-812.
- Daganzo, C. (1984): The distance traveled to visit n points with a maximum of c stops per vehicle: An analytic model and an application, in *Transportation Science* 18 (1984), Seite 331-350.
- Dantzig, G./ Ramser, J. (1959): The truck dispatching problem, in *Management Science* 6 (1959), Seite 80-91.
- Desrosiers, J./ Dumas, Y./ Solomon, M./ Soumis, F. (1995): Time constrained routing and scheduling, in Ball, M.O./ Magnanti, T.L./ Monma, C.L./ Nemhauser, G.L. (1995), *Network Routing*, Amsterdam 1995, Elsevier, Seite 35-140.
- Dethloff, J. (1994): Verallgemeinerte Tourenplanungsprobleme: Klassifizierung, Modellierung, Lösungsmöglichkeiten, Göttingen 1994, Vandenhoeck & Ruprecht.
- Diestel, R. (1996): Graphentheorie, Berlin 1996, Springer.
- Diruf, G. (1990): Probleme und Entwicklungstendenzen der computergestützten Tourenplanung, in *Zeitschrift für Planung* (1990), Nr. 1, Seite 5-23.
- Diruf, G. (1999): Modelle und Methoden der Transportplanung, in Weber, J./ Baumgarten, H. (1999), *Handbuch Logistik*, Stuttgart 1999, Schäffer-Poeschel, Seite 367-391.
- Domschke, W. (1997): *Logistik: Rundreisen und Touren*, München 1997, Oldenbourg.
- Domschke, W./ Drexl, A. (2005): *Einführung in Operations Research*, Berlin 2005, Springer.
- Domschke, W./ Scholl, A. (2002): *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*, Berlin 2002, Springer.
- Dror, M. (2000): *Arc routing: Theory, solutions and applications*, Norwell 2000, Kluwer.
- Dumas, Y./ Desrosiers, J./ Soumis, F. (1991): The pickup and delivery problem with time windows, in *European Journal of Operational Research* 54 (1991), Seite 7-22.
- Eddelbüttel, J. (1997): *Exakte Verfahren für das Standardproblem der Tourenplanung*, Hamburg 1997.

- Ehrmann, H. (2003): Logistik, Ludwigshafen 2003, Kiehl.
- Eibl, P. (1996): Computerised vehicle routing and scheduling in road transport, Aldershot 1996, Avebury.
- Eiselt, H./ Gendreau, M./ Laporte, G. (1995): Arc routing problems, Part I: The Chinese postman problem, in Operations Research 43 (1995), Seite 231-242.
- Eiselt, H./ Sandblom, C.-L. (2000): Integer programming and network models, Berlin 2000, Springer.
- Elbert, R./ Gomm, M. (2003): Zukunftsforschung Güterverkehr, in Pfohl, H.-C. (2003), Güterverkehr, Berlin 2003, Schmidt, Seite 79-122.
- Engle, G. (1981): Simultane Standort- und Tourenplanung, Köln 1981, Heymann.
- Erkens, E. (1998): Kostenbasierte Tourenplanung im Straßengüterverkehr, Bremen 1998.
- Eurocargo (2004a): Durchblick im Chaos, o. V., in Eurocargo 01-02/2004, Seite 14-17.
- Eurocargo (2004b): Disponieren und jonglieren, o. V., in Eurocargo 03/2004, Seite 34-35.
- Fahrion, R./ Wrede, M. (1990): On a principle of chain-exchange for vehicle-routeing problems (1-VRP), in Journal of the Operational Research Society 41 (1990), Seite 821-827.
- Feldmann, M. (1999): Naturanaloge Verfahren - Metaheuristiken zur Reihenfolgeplanung, Wiesbaden 1999, Deutscher Universitäts-Verlag.
- Fisher, M. (1995): Vehicle routing, in Ball, M.O./ Magnanti, T.L./ Monma, C.L./ Nemhauser, G.L. (1995), Network Routing, Amsterdam 1995, Elsevier, Seite 1-34.
- Fleischmann, B. (1998): Tourenplanung, in Isermann, H. (1998), Gestaltung von Logistiksystemen, Landsberg/ Lech 1998, Moderne Industrie, Seite 287-302.
- Fleischmann, B./ Gietz, M./ Gnutzmann, S. (2004a): Time-varying travel times in vehicle routing, in Transportation Science 38 (2004), Seite 160-173.
- Fleischmann, B./ Gnutzmann, S./ Sandvoß, E. (2004b): Dynamic vehicle routing based on online traffic information, in Transportation Science 38 (2004), Seite 420-433.
- Fleischmann, B./ Gietz, M. (2002): Transport- und Tourenplanung, in Arnold, D./ Isermann, H./ Kuhn, A./ Tempelmeier, H. (2002), Handbuch Logistik, Heidelberg 2002, Springer, Seite A 3-45 - A 3-61.
- Fullerton, R./ Watters, C./ Fawson, C. (2003): An examination of the relationship between JIT and financial performance, in Journal of Operations Management 21 (2003), Seite 383-404.
- Funke, B. (2003): Effiziente lokale Suche für Vehicle Routing and Scheduling Probleme mit Ressourcenbeschränkungen, Aachen 2003, Elektronische Ressource.

- Garey, M./ Graham, R./ Johnson, D. (1976): Some NP-complete geometric problems, in Proceedings 8th Ann. ACM Symposium Theory of Computing (1976), Seite 10-22.
- Garey, M./ Johnson, D. (1999): Computers and intractability, New York 1999, Freeman.
- Gendreau, M./ Laporte, G./ Seguin, R. (1995): An exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic customers and demands, in Transportation Science 29 (1995), Seite 143-155.
- Gendreau, M./ Laporte, G./ Seguin, R. (1996): Stochastic vehicle routing, in European Journal of Operational Research 88 (1996), Seite 3-12.
- Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (1998): Dynamic vehicle routing and dispatching, in Crainic, T./ Laporte, G. (1998), Fleet management and logistics, Boston 1998, Kluwer, Seite 115-126.
- Gendreau, M./ Guertin, F./ Potvin, J.-Y./ Taillard, E. (1999): Parallel Tabu Search for real-time vehicle routing and dispatching, in Transportation Science 33 (1999), Seite 381-390.
- Gendreau, M./ Laporte, G./ Potvin, J.-Y. (2002) : Metaheuristics for the capacitated VRP, in Toth, P./ Vigo, D. (2002), The vehicle routing problem, Philadelphia 2002, SIAM.
- Ghiani, G./ Guerriero, F./ Laporte, G./ Musmanno, R. (2003): Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies, in European Journal of Operational Research 151 (2003), Seite 1-11.
- Giaglis, G./ Minis, I./ Tatarakis, A./ Zeimpekis, V. (2004): Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies, in International Journal of Physical Distribution and Logistics Management 34 (2004), Seite 749-764.
- Giannopoulos, G.A. (2004): The application of information and communication technologies in transport, in European Journal of Operational Research 152 (2004), Seite 302-320.
- Gietz, M. (1994): Computergestützte Tourenplanung mit zeitkritischen Restriktionen, Heidelberg 1994, Physica.
- Gillet, B.E. und Miller, L.R. (1974): A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem, in Operations Research 22 (1974), S. 340-349.
- Glover, F. (1986): Future paths for Integer programming and links to artificial intelligence, in Computer and Operations Research 13 (1986), S. 533-549.
- Glover, F./ Laguna, M. (1997): Tabu Search, Boston 1997, Kluwer.
- Goldberg, D. E. (1989): Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading 1989, Addison-Wesley.

- Golden, B./ Wasil, E./ Kelly, J./ Chao, I.-M. (1998): Metaheuristics in vehicle routing, in Crainic, T./ Laporte, G. (1998), Fleet management and logistics, Boston 1998, Kluwer, Seite 33-56.
- Grass, B. (2003): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, Berlin 2003, Neue Wirtschafts-Briefe.
- Gutenberg, E. (1990): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, Wiesbaden 1990, Gabler.
- Haghani, A./ Tian, Q./ Hu, H. (2003): A simulation model for real-time emergency vehicle dispatching and routing, TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM.
- Hamdy, T. (2003): Operations research, Upper Saddle River 2003, Prentice Hall.
- Heiserich, O.-E. (2002): Logistik, Wiesbaden 2002, Gabler.
- Hillert, F. (1992): Routenoptimierung mit Greedy-Algorithmen, Egelsbach 1992, Hänsel-Hohenhausen.
- Hirsch, T. (1998): Auslieferungstouren in der strategischen Distributionsplanung, Wiesbaden 1998, Gabler.
- Holland, J. M. (1975): Adaption in Natural and Artifical Systems, Cambridge 1975, MIT Press.
- Homberger, J. (2000): Verteilt-parallele Metaheuristiken zur Tourenplanung, Wiesbaden 2000, Gabler.
- Ichoua, S./ Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (2000): Diversion issues in real-time vehicle dispatching, in Transportation Science 34 (2000), Seite 426-438.
- Ichoua, S./ Gendreau, M./ Potvin, J.-Y. (2003): Vehicle dispatching with time-dependent travel times, in European Journal of Operational Research 144 (2003), Seite 379-396.
- Isermann, H. (1998), Gestaltung von Logistiksystemen, Landsberg/ Lech 1998, Moderne Industrie.
- IWD (1999): Straßenbau - Am falschen Platz gespart, Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln 1999, Nr. 30 vom 29. Juli 1999, www.iwkoeln.de.
- Jaillet, P. (1985): Probabilistic traveling Salesman Problem, Ph. D. Thesis, Technical Report no. 185, Operations Research Center, Massachusetts, Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Jaillet, P./ Odoni, A. (1988): The probabilistic vehicle routing problem, in Golden, B./ Assad, A. (1988), Vehicle Routing: Methods and Studies, Amsterdam 1988, North-Holland, Seite 293-318.

- Jungnickel, D. (1994): Graphen, Netzwerke und Algorithmen, Mannheim 1994, BI-Wissenschaftsverlag.
- Jünemann, R. (1989): Materialfluss und Logistik, Berlin 1989, Springer.
- Kabath, M. (1997): Das Konzept der periodischen Tourenplanung, Aachen 1997, Shaker.
- Karg, R./ Thomson, G. (1964): A heuristic approach to solving traveling salesman problems, in Management Science 10 (1964), S. 225-248.
- Kilby, P./ Prosser, P./ Shaw, P. (1998): Dynamic VRPs: a study of scenarios, Technical Report APES06 -1998, University of Strathclyde, September 1998.
- Krampe, H./ Lucke, H.-J. (2001): Grundlagen der Logistik, München 2001, Huss.
- Kuhn, H. (1992): Heuristische Suchverfahren mit simulierter Abkühlung, in Wirtschaftswissenschaftliches Studium 21 (1992), Seite 387-391.
- Lackner, A. (2003): Dynamische Tourenplanung mit ausgewählten Metaheuristiken, Göttingen 2003, Cuvillier.
- Läpple, D. (1995): Güterverkehr, Logistik und Umwelt, Berlin 1995, edition sigma.
- Laporte, G./ Nobert, Y. (1987): Exact algorithms for the vehicle routing problem, in Annals of Discrete Mathematics 31 (1987), Seite 147-184.
- Laporte, G. (1992): The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms, in European Journal of Operational Research 59 (1992), Seite 345-358.
- Laporte, G./ Louveaux, F./ Mercure, H. (1992): The vehicle routing problem with stochastic travel times, in Transportation Science 26 (1992), Seite 161-170.
- Laporte, G./ Louveaux, F./ Mercure, H. (1994): A priori optimization of the probabilistic traveling salesman problem, in Operations Research 42 (1994), Seite 543-549.
- Laporte, G./ Gendreau, M./ Potvin, J.-Y./ Semet, F. (2000): Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem, in International Transactions in Operational Research 7 (2000), Seite 285-300.
- Larsen, A./ Madsen, O./ Solomon, M. (2002): Partially dynamic vehicle routing - models and algorithms, in Journal of the Operational Research Society 53 (2002), Seite 637-646.
- Larsen, A. (2001): The dynamic vehicle routing problem, Ph. D. Thesis, Institute of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2001.
- Larsen, A./ Madsen, O./ Solomon, M. (2004): The A Priori Dynamic Traveling Salesman Problem with Time Windows, in Transportation Science 38 (2004), Seite 459-472.

- Lasch, R. (1998): Marktorientierte Gestaltung von Logistikprozessen, Wiesbaden 1998, Gabler.
- Lasch, R./ Janker, C./ Deckl, A. (1998): Telematik im Straßengüterverkehr, Arbeitspapiere zur mathematischen Wirtschaftsforschung, Nr. 160/1998, Augsburg 1998.
- Lawler, E. (2001): Combinatorial optimization, Mineola 2001, Dover.
- Lehner, F. (2003): Mobile und drahtlose Informationssysteme, Berlin 2003, Springer.
- Lenstra, J./ A. Rinnooy Kan (1981): Complexity of vehicle routing and scheduling problems, in Networks 11 (1981), Seite 221-227.
- Lin, S. (1965): Computer solutions of the traveling salesman problem, in Bell System Technical Journal 44 (1965), Seite 2245-2269.
- Logistik heute (2001): Das weite Feld der Tourenoptimierung, o. V., in Logistik heute 12/2001, Seite 37-39.
- Lublow, R. (1997): Mobile Informationssysteme für die Güterverkehrslogistik, Renningen-Malmsheim 1997, expert.
- Lund, K./ Madsen, O./ Rygaard, J. (1996): Vehicle routing problems with varying degrees of dynamism. Technical report, IMM, The Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 1996.
- Malandraki, C. (1989): Time dependent vehicle routing problems: Formulations, solution algorithms and computations experiments, Ph. D. Dissertation, Northwestern University, Evanston.
- Matthäus, F. (1978): Tourenplanung – Verfahren zur Einsatzdisposition von Fuhrparks, Darmstadt 1978, S. Toeche-Mittler.
- Meusemann, B. (1996): Verkehrsinformationen im Rundfunk, in Siegle, G. (1996), Telematik im Verkehr, Heidelberg 1996, R. v. Decker, Seite 49-56.
- Neumann, K. (1992): Graphen und Netzwerke, in Gal, T. (1992), Grundlagen des Operations Research, Band 2, Berlin 1992, Springer, Seite 1-164.
- Neumann, K./ Morlock, M. (2002): Operations Research, München 2002, Hanser.
- Noltemeier, H. (1976): Graphentheorie, Berlin 1976, de Gruyter.
- Novak, B. (1999): Computerunterstützte Tourenplanung: Faktorenanalyse zur Ermittlung wichtiger Restriktionen, in Faller, P. (1999), Transportwirtschaft im Umbruch, Wien 1999, Linde, Seite 441-450.
- Oertel, P. (2000): Routing with reloads, Köln 2000.

- Or, I. (1976): Traveling salesman-type combinatorial problems and their relations to the logistics of blood-banking, Ph. D. Thesis, Northwestern University (Dept. of Industrial Engineering and Management Sciences), 1976.
- Osman, I. H. (1993): Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem, in *Annals of Operations Research* 41 (1993), Seite 421-451.
- Otten, H. (1998): Verfahren zur Lösung von Tourenproblemen in der Abfallwirtschaft, Dortmund 1998, Praxiswissen.
- Pankratz, G. (2002): Speditionelle Transportdisposition - Modell- und Verfahrensentwicklung unter Berücksichtigung von Dynamik und Fremdvergabe, Wiesbaden 2002, Deutscher Universitäts-Verlag, Gabler Edition Wissenschaft.
- Papadimitriou, C. (1977): The euclidean traveling salesman problem is NP-complete, in *Theoretical Computer Science* 4 (1977), Seite 237-244.
- Papadimitriou, C./ Steiglitz, J. (1982): Combinatorial optimization: Algorithms and complexity, Englewood Cliffs 1982, Prentice-Hall.
- Papastavrou, J. (1996): A stochastic and dynamic routing policy using branching processes with state dependent immigration, in *European Journal of Operational Research* 95 (1996), Seite 167-177.
- Paessens, H. (1987): Tourenplanung mit TourMaster, München 1987, Oldenbourg.
- Paessens, H. (1988): The savings algorithm for the vehicle routing problem, in *European Journal of Operational Research* 34 (1988), Seite 336-344.
- Pfliegl, R. (1999): Telematikgestützte Informationsketten - Ausgangspunkt für die Realisierung neuer Konzepte in der Transportlogistik, in Faller, P. (1999), *Transportwirtschaft im Umbruch*, Wien 1999, Linde, Seite 341-352.
- Pfohl, H.-C. (2004a): Logistikmanagement, Berlin 2004, Springer.
- Pfohl, H.-C. (2004b): Logistiksysteme, Berlin 2004, Springer.
- Powell, W./ Jaillet, P./ Odoni, A. (1995): Stochastic and dynamic networks and routing, in Ball, M. (1995), *Network routing*, Amsterdam 1995, Elsevier, Seite 141-296.
- Prog Trans (2004): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr, Verkehrsprognose Winter 2003/2004, Prog Trans AG, www.progtrans.com.
- Psaraftis, H. (1988): Dynamic vehicle routing problems, in Golden, B./ Assad, A. (1988), *Vehicle Routing: Methods and Studies*, Amsterdam 1988, North-Holland, Seite 223-248.
- Psaraftis, H. (1995): Dynamic vehicle routing: Status and prospects, in *Annals of Operations Research* 61 (1995), Seite 143-164.

- Reeves, C. (1993): Modern heuristic techniques for combinatorial problems, Oxford 1993, Blackwell.
- Regan, A. et al./ Mahmassani, H./ Jaillet, P. (1998), Evaluation of dynamic fleet management systems: simulation framework, in Transportation Res. Record 1645 (1998), Seite 176-184.
- Reinelt, G. (1994): The traveling salesman - computational solutions for TSP applications, Berlin 1994, Springer.
- Rushton, A./ Oxley, J./ Croucher, P. (2000): Logistics and distribution management, London 2000, Kogan Page.
- Röscher, P. (1993): Rechnergestützte Tourenplanung unter besonderer Berücksichtigung praktischer Restriktionen, Bremen 1993.
- Sandvoß, E. (2004): Dynamische Tourenplanung auf Basis von online-Verkehrsinformationen, Berlin 2004, Pro Business.
- Savelsbergh, M. W. P. (1991): The vehicle routing problem with time windows: minimizing route duration. Working Paper (COSOR Memorandum 91-03), Eindhoven University of Technology, Januar 1991.
- Schmalz, A. (2002): Design elektronischer Märkte für die Tourenplanung, Göttingen 2002, Cuvillier.
- Schmidthöfer, A. (2004): Taktische Bestimmung von Tourgebieten für die expeditionelle Tourenplanung, Aachen 2004, Shaker.
- Schreiber, A. (2004): Telemetrie und Telematik in der Logistik, München 2004, Deutscher Wirtschaftsdienst.
- Schubert, W. (2000): Verkehrslogistik, München 2000, Vahlen.
- Schulte, C. (1999): Logistik, München 1999, Vahlen.
- Solomon, M. (1987): Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints, in Operations Research 35 (1987), Seite 254-265.
- Solomon, M. (2004): <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm> (Abgerufen am: 10.06.2004).
- Solomon, M./ Desrosiers, J. (1988): Time window constrained routing and scheduling problems, in Transportation Science 22 (1988), Seite 1-13.
- Stählin, W. (1973): Theoretische und technologische Forderung in der Betriebswirtschaftslehre, Stuttgart 1973.

- Stumpf, P. (1998): Tourenplanung im speditionellen Güterfernverkehr, Nürnberg 1998, GVB, Bd. 39.
- Taillard, E./ Badeau, P./ Gendreau, M. (1997): A Tabu Search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows, in *Transportation Science* 31 (1997), Seite 170-186.
- Tan, K. (2001): A framework of supply chain management literature, in *European Journal of Purchasing & Supply Management* 7 (2001), Seite 39-48.
- Teichmann, S. (1989): Logistikkostenrechnung, Untersuchungen zur Bedeutung und Methodik einer betriebswirtschaftlichen Logistikkostenrechnung mittelständischer Industriebetriebe, Berlin 1989, Dunker & Humblot.
- Thommen, J.-P./ Achleitner, A.-K. (2003): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Wiesbaden 2003, Gabler.
- Toth, P./ Vigo, D. (1998): Exact solution of the vehicle routing problem, in Crainic, T./ Laporte, G. (1998), *Fleet management and logistics*, Boston 1998, Kluwer, Seite 1-32.
- Toth, P./ Vigo, D. (2002): *The vehicle routing problem*, Philadelphia 2002, SIAM.
- Transporting (2003): Nie wieder auf Abwegen, o. V., in *Transporting* 03/2003, Seite 16-17.
- Transporting (2004a): Ja wo is' er denn?, o. V., in *Transporting* 04/2004, Seite 20-21.
- Transporting (2004b): Die Ortung ist das halbe Leben, o. V., in *Transporting* 06/2004, Seite 12-15.
- Uhr, W./ Lasch, R. (2003): *Logistik – BWL Lernsoftware interaktiv*, Stuttgart 2003, Schäffer-Poeschel Verlag.
- Ulrich, H. (1984): *Management*, Bern 1984, Haupt.
- Ulrich, P./ Hill, W. (1979): Wissenschaftstheoretische Aspekte ausgewählter betriebswirtschaftlicher Konzeptionen, in Raffee, H./ Abel, B. (1979), *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Wirtschaftswissenschaften*, S. 161-190, München 1979, Vahlen.
- Universität Karlsruhe (TH) - Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research (WIOR) (2004), www.wior.uni-karlsruhe.de/bibliothek/vehicle/com (Abgerufen am: 27.10.2004).
- Urban, K.-P. (2004): *Planung von Just-in-Time-Belieferungen mit lokalen Suchverfahren*, Lüneburg 2004, Books on Demand.
- Vahrenkamp, R. (1998): *Logistikmanagement*, München 1998, Oldenbourg.
- Vahrenkamp, R. (2003): *Quantitative Logistik für das Supply Chain Management*, München 2003, Oldenbourg.

- Van Breedam, A. (1996): An analysis of the effect of local improvement operators in genetic algorithms and simulated annealing for the vehicle routine problem, RUCA Working Paper 96/14, University of Antwerp: Belgium.
- Vastag, A./ Schürholz, A. (2002): Distribution, in Arnold, D./ Isermann, H./ Kuhn, A./ Tempelmeier, H. (2002), Handbuch Logistik, Heidelberg 2002, Springer, Seite B 5-1 - B 5-53.
- Vogt, M. (1998): Tourenplanung in Ballungsgebieten, Wiesbaden 1998, Gabler.
- Volkman, L. (1996): Fundamente der Graphentheorie, Wien 1996, Springer.
- Wannenwetsch, H. (2002): E-Logistik und E-Business, Stuttgart 2002, Kohlhammer.
- Waters, C. D. J. (1987): A solution procedure for the vehicle-scheduling problem based on iterative route improvement, in Journal of the Operational Research Society 38 (1987), Seite 833-839.
- Weissermel, M. (1999), Tourenplanungsprobleme mit Zeitfensterrestriktionen, Göttingen 1999, Vandenhoeck und Ruprecht, Bd. 48.
- Wels, A./ Richter, A. (2005): Heuristische Lösungsverfahren für das Probabilistic Traveling Salesman Problem, in Günther, H.-O./ Mattfeld, D. C./ Suhl, L. (2005), Supply Chain Management und Logistik, Heidelberg 2005, Physica, Seite 401-418.
- Weuthen, H.-K. (1983): Tourenplanung - Lösungsverfahren für Mehrdepot-Probleme, Karlsruhe 1983.
- White, R./ Pearson, J./ Wilson, J. (1999): JIT Manufacturing: A Survey of Implementations in Small and Large U.S. Manufacturers, in Management Science 45 (1999), Seite 1-15.
- Wiechert, A. (2003): Telematikanwendung in Transport und Logistik, in VDI-Berichte 1782, Telematik 2003, Düsseldorf 2003, VDI, Seite 191-198.
- Wiedey, H. (1982): Tourenplanung bei großer Kundenanzahl, Kiel 1982, Vauk.
- Wildemann, H. (1997): Logistik Prozessmanagement, München 1997, TCW.
- Wöhe, G. (1996): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, München 1996, Vahlen.
- Wren, A./ Holiday, A. (1972): Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points, in Operational Research Quarterly 23 (1972), Seite 333-344.
- Yang, J./ Jaillet, P./ Mahmassani, H. (1998), On-line algorithms for truck fleet assignment and scheduling under real-time information, in Transportation Res. Record 1667 (1998), Seite 107-113.

Yang, J./ Jaillet, P./ Mahmassani, H. (2004), Real-time multivehicle truckload pickup and delivery problems, in Transportation Science 38 (2004), Seite 135-148.

Zimmermann, W. (1999): Operations Research, München 1999, Oldenbourg.

Anhang A1:

Prozentuale Abweichung zwischen den Lösungen der zwei Varianten (*Änderung des aktuellen Zuges möglich/nicht möglich*) nach den Zielkriterien und durchschnittliche Tourlänge

Prozentuale Abweichung zwischen Alternative <i>Änderung des aktuellen Zuges möglich</i> bzw. <i>nicht möglich</i> in Bezug auf Zielkriterium Tourlänge? (in %)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	2,8	10,3	3,5	9,5	3,1	8,5	2,9	10,1
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,8	4,7	5,3	5,0	2,1	1,5	4,2	15,6
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,1	2,9	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	5,8
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,4	5,0	5,6	5,7	3,4	2,5	4,4	16,5
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,2	2,8	3,4	2,9	3,2	3,1	3,2	6,9
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,3	4,4	5,4	5,2	4,1	3,7	5,2	16,7
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,5	3,6	3,8	3,2	2,2	1,3	3,3	9,8
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	4,0	4,5	4,3	4,2	1,4	1,2	3,4	15,9
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,7	4,1	4,5	4,1	2,7	2,3	3,1	11,8
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,6	4,2	4,1	4,1	2,0	2,2	4,1	15,8
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	3,5	3,5	3,9	3,9	3,1	2,9	2,8	12,0
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	3,4	3,7	3,7	4,4	3,1	3,5	3,5	17,1
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,4	2,6	2,7	2,6	1,1	1,1	2,6	14,1
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	1,9	3,1	1,7	3,2	1,7	3,2	1,4	4,5
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	2,0	2,5	2,6	2,8	1,6	2,0	2,5	15,6
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	2,4	2,2	2,4	2,2	1,9	1,7	1,7	6,9
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	1,8	2,4	2,8	3,1	2,2	2,6	2,9	15,6
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	2,4	2,3	2,3	2,2	1,9	2,0	1,6	8,6
gewichteter Durchschnitt	3,2	3,9	3,6	4,1	2,6	3,1	3,2	12,3

Tab. A1-1: DTSP Testauswertung - Prozentuale Abweichung zwischen Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium Tourlänge

Prozentuale Abweichung zwischen Alternative <i>Änderung des aktuellen Zuges möglich</i> bzw. <i>nicht möglich</i> in Bezug auf Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden? (in %)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	4,6	5,5	5,2	5,5	1,4	1,5	3,3	15,4
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	8,2	8,2	8,6	8,1	3,2	2,8	5,9	18,9
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	10,0	10,2	9,8	10,7	4,6	3,3	8,4	25,5
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	9,9	12,1	10,6	12,6	4,4	4,6	8,0	25,1
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	14,9	13,6	13,2	15,0	9,4	6,1	11,5	35,6
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	10,6	12,6	11,6	12,7	7,0	6,3	8,5	28,8
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	7,2	7,6	7,1	6,0	1,2	1,3	4,7	18,0
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	7,9	8,2	7,6	7,0	2,3	2,3	4,3	17,2
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	12,5	13,8	12,1	11,5	3,0	3,2	8,5	29,5
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	8,1	9,9	8,4	8,7	3,3	3,5	5,4	21,9
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	12,5	14,8	13,1	13,7	6,4	5,7	6,9	35,5
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	8,7	10,2	8,5	9,9	4,6	5,4	5,1	24,6
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	4,1	5,0	4,8	4,8	1,6	1,9	3,3	12,3
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	7,4	6,9	6,2	5,8	0,7	0,8	4,9	17,6
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	3,8	5,4	4,8	5,5	2,4	2,6	3,7	14,0
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	12,3	12,0	11,9	10,1	2,4	2,4	5,8	30,5
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	3,3	5,3	4,9	6,1	2,9	3,2	4,4	14,4
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	13,9	15,0	13,1	12,0	5,4	4,9	6,0	40,7
gewichteter Durchschnitt	9,2	9,6	9,0	9,2	4,0	3,8	6,6	23,7

Tab. A1-2: DTSP Testauswertung - Prozentuale Abweichung zwischen Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf das Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit über alle Kunden

Prozentuale Abweichung zwischen Alternative Änderung des aktuellen Zuges möglich bzw. nicht möglich in Bezug auf Zielkriterium durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden? (in %)	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	20,0	18,8	17,7	20,2	14,9	12,9	17,8	30,4
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	17,2	16,4	19,3	16,1	15,7	9,8	24,2	25,1
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	16,7	14,6	16,1	13,0	12,0	5,7	15,3	27,3
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	12,6	13,0	15,0	14,4	8,9	7,5	11,0	23,9
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	18,0	14,0	15,9	14,9	12,2	7,1	13,8	24,2
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	11,2	11,9	12,6	12,7	8,4	6,3	10,8	22,6
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	15,2	16,6	16,5	13,6	6,7	5,6	13,6	30,6
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	14,3	13,0	15,0	13,0	7,5	8,0	12,8	21,6
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	13,8	13,4	14,4	13,2	6,2	4,9	10,1	30,5
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	9,5	10,6	10,4	10,4	5,2	5,5	7,9	20,5
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	12,8	13,9	13,8	13,1	7,6	6,0	6,8	29,0
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	8,6	9,8	8,4	9,5	5,1	5,2	6,1	21,1
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	8,6	9,8	9,9	9,4	4,4	6,9	10,0	13,2
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	14,7	13,3	14,6	12,9	5,6	3,1	11,7	33,7
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	5,3	6,2	6,6	6,7	3,5	3,4	4,9	12,7
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	14,9	14,9	14,0	12,2	5,3	4,5	7,6	38,5
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	3,6	5,3	5,6	6,3	3,1	3,2	4,7	12,1
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	13,3	14,9	13,1	12,2	6,6	5,5	5,1	38,9
gewichteter Durchschnitt	13,3	12,4	13,5	12,2	8,0	5,8	13,1	25,6

Tab. A1-3: DTSP Testauswertung - Prozentuale Abweichung zwischen Alternative **Änderung des aktuellen Zuges möglich** bzw. **nicht möglich** in Bezug auf das Zielkriterium **durchschnittliche Wartezeit der dynamischen Kunden**

Durchschnittliche Tourlänge [in km]	SE AAZ	SE KEINE	CO AAZ	CO KEINE	NN AAZ	NN KEINE	SAV AAZ	SAV KEINE
50 GK, 10 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	191,6	180,5	192,4	182,7	195,4	186,6	197,5	184,9
50 GK, 10 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	709,1	713,2	721,7	725,8	751,5	754,1	811,1	737,9
50 GK, 25 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	224,0	225,9	225,3	226,8	227,3	229,0	231,9	226,8
50 GK, 25 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	784,8	785,0	797,1	797,1	811,1	817,7	895,2	802,4
50 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	242,0	244,0	243,4	245,5	246,3	248,8	254,0	246,5
50 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	824,6	828,0	845,4	848,2	856,4	863,1	946,1	855,4
100 GK, 20 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	232,2	232,6	233,4	235,7	236,4	238,0	253,5	237,2
100 GK, 20 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	960,5	956,4	967,8	972,4	1014,5	1017,0	1124,2	1006,9
100 GK, 50 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	266,6	267,1	267,4	268,8	267,0	268,8	295,5	270,7
100 GK, 50 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	1028,6	1023,8	1043,7	1045,0	1076,3	1080,0	1199,3	1070,0
100 GK, 80 dyn., AEZ 4 h, 20x20km	289,4	288,9	291,3	291,7	289,5	291,1	321,2	293,4
100 GK, 80 dyn., AEZ 8 h, 100x100km	1073,4	1069,3	1093,9	1088,8	1122,6	1124,5	1264,9	1118,6
200 GK, 40 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	1231,4	1225,9	1250,1	1251,2	1353,1	1353,4	1494,0	1346,0
200 GK, 40 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	413,7	410,5	414,3	410,5	416,5	411,4	425,3	412,7
200 GK, 100 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	1263,9	1255,7	1289,9	1284,9	1382,8	1383,3	1546,7	1378,1
200 GK, 100 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	460,0	461,3	460,0	461,9	458,8	460,7	491,2	464,2
200 GK, 160 dyn., AEZ 4 h, 100x100km	1284,7	1274,7	1313,3	1308,0	1405,3	1407,9	1571,8	1399,2
200 GK, 160 dyn., AEZ 8 h, 20x20km	495,3	495,2	495,1	496,3	490,7	491,5	536,7	498,5

Tab. A1-4: DTSP Testauswertung - Durchschnittliche Tourlänge

Anhang A2:*Vergleich der modifizierten Verfahren Bester Nachfolger, Sukzessive Einbeziehung, Christofides und Savings-Verfahren am Beispiel von LARSEN*

Im Folgenden werden die modifizierten Verfahren zum dynamischen Traveling Salesman Problem anhand eines aus der Literatur bekannten Beispiels, das aus der Arbeit von LARSEN stammt, verglichen.⁴³³ Der Datensatz umfasst 30 Kunden, wobei 21 statische Kunden (vgl. Tab. A2-1) und 9 dynamische Kunden (vgl. Tab. A2-2) vorliegen.

Nr.	x	y	SZ [hh:mm:ss]	AZ [hh:mm:ss]
1	7300,5	4221,1	1,70	8:00:00
2	9662,7	2031,5	2,48	8:00:00
3	6932,8	7843,1	1,35	8:00:00
4	4910,9	6230,7	1,05	8:00:00
5	475,6	6169,9	0,97	8:00:00
6	4489,5	2903,8	1,59	8:00:00
7	6494,2	4983,0	2,72	8:00:00
8	2551,1	888,2	2,96	8:00:00
9	4288,3	1937,7	2,16	8:00:00
10	6513,4	5424,6	3,30	8:00:00
11	2286,2	5388,3	3,46	8:00:00
12	6886,9	3677,3	2,03	8:00:00
13	1069,9	9942,6	1,99	8:00:00
14	6688,0	7829,2	2,52	8:00:00
15	5939,0	8335,7	1,27	8:00:00
13	1069,9	9942,6	4,14	8:00:00
17	1428,6	671,3	1,08	8:00:00
18	6236,2	5525,7	4,74	8:00:00
19	2188,2	9661,7	5,74	8:00:00
20	715,6	9758,0	4,05	8:00:00
21	9102,3	4087,6	2,10	8:00:00

Tab. A2-1: Koordinaten der statischen Kunden (Bezeichnungen: Nr. - Bezeichnung des Kunden, x,y - Koordinaten, SZ - Standzeit, AZ - Auftragseingangszeit)

Nr.	x	y	SZ [hh:mm:ss]	AZ [hh:mm:ss]
22	9290,6	9957,0	3,02	8:00:02
23	4885,3	546,3	2,28	8:09:43
24	7246,7	7562,4	2,40	8:21:43
25	4826,6	4643,8	8,79	8:50:23
26	9507,2	5241,5	3,50	9:16:17
27	9723,0	185,1	1,11	10:45:15
28	2848,2	4542,5	0,99	11:15:36
29	3330,7	223,2	1,49	12:58:09
30	5255,1	9677,2	2,33	13:32:49

Tab. A2-2: Koordinaten der dynamischen Kunden

LARSEN wendet als Heuristiken in seiner Arbeit FCFS (First Come First Serve), FCFS SQM (FCFS, aber Fahrzeug sucht bei Nichtvorliegen neuer Aufträge einen Median auf), PART (das zu bedienende Gebiet wird in Teilgebiete aufgeteilt, wobei dann jedes Teilgebiet nach FCFS abgearbeitet wird) und NN (Nearest Neighbor (Bester Nachfolger)) auf das DTSP an.⁴³⁴ Die Heuristik NN schneidet in den Tests von LARSEN am besten ab. Dabei muss beachtet werden, dass bei LARSEN, wie in Kapitel 3.4.2 erwähnt, ein einmal anvisierter Kunde, d. h. der aktuelle Zug, nicht mehr geändert werden darf. Aus diesem Grund wurde den Berechnungen, deren Ergebnisse in Tabelle A2-3 präsentiert werden, zum einen die gleiche Prämisse zugrundegelegt, um zu zeigen, dass selbst bei Beachtung dieser Restriktion die

⁴³³ Vgl. Larsen, A. (2001), S. 159 (Appendix B).

⁴³⁴ Vgl. zu den Strategien Kapitel 3.4.2.

neuen Verfahren (z. B. modifizierte Sukzessive Einbeziehung und modifiziertes Verfahren von Christofides) bessere Ergebnisse erzielen als das Verfahren Bester Nachfolger bei *Änderung aktueller Zug nicht möglich*. Zum anderen erfolgte die Anwendung der Verfahren für den Fall, dass die Möglichkeit besteht den aktuellen Zug zu ändern, um zusätzliches Optimierungspotenzial aufzudecken, wenn die Prämisse aufgehoben wird. Zu beachten ist, dass bei diesem Beispiel von LARSEN Standzeiten bei jedem Kunden anfallen. Die Wartezeit gibt die Zeitspanne zwischen Auftragseingang und Abfahrt des Fahrzeuges beim Kunden (Serviceendzeitpunkt) an.⁴³⁵

	Verfahren	Tourlänge	durchschnittliche Wartezeit	durchschn. WZ dynam. Kunden
Änderung aktueller Zug nicht möglich	Bester Nachfolger	88,9 km	1:00 hh:mm	0:42 hh:mm
	Sukzessive Einbeziehung	88,3 km	0:59 hh:mm	0:45 hh:mm
	Christofides	88,4 km	1:01 hh:mm	0:35 hh:mm
	Savingsverfahren	89,5 km	1:01 hh:mm	0:44 hh:mm
Änderung aktueller Zug möglich	Bester Nachfolger	88,9 km	1:00 hh:mm	0:42 hh:mm
	Sukzessive Einbeziehung	87,6 km	1:00 hh:mm	0:47 hh:mm
	Christofides	87,9 km	1:06 hh:mm	0:45 hh:mm
	Savingsverfahren	89,5 km	1:01 hh:mm	0:44 hh:mm

Tab. A2-3: Vergleich der dynamischen Rundreiseverfahren anhand Beispiel Larsen

Das modifizierte Verfahren Sukzessive Einbeziehung erzeugt beim 30 Kunden-Beispiel bei beiden Varianten die kürzeste Rundreiselänge mit 87,6 km (Änderung aktueller Zug) bzw. 88,3 km (keine Änderung aktueller Zug). Bei dem modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung und dem modifizierten Verfahren von Christofides schneidet jeweils die Variante Änderung aktueller Zug möglich in Bezug auf die Tourlänge besser ab als die Variante keine Änderung aktueller Zug. Erfolgt die Betrachtung der durchschnittlichen Wartezeit über alle Kunden, schneiden die modifizierten Verfahren Sukzessive Einbeziehung, mit 59 Minuten bei keine Änderung aktueller Zug und 1,0 Stunden bei Änderung aktueller Zug, und Bester Nachfolger, mit 1,0 Stunden bei Änderung aktueller Zug und 1,0 Stunden bei keine Änderung aktueller Zug, am besten ab. Bei der durchschnittlichen Wartezeit der dynamischen Kunden weist bei der Variante Änderung aktueller Zug möglich das modifizierte Verfahren von Christofides mit 35 Minuten und bei der Variante keine Änderung aktueller Zug das Verfahren Bester Nachfolger mit 42 Minuten den besten Wert auf. Auch bei diesem Beispiel ist der Zielkonflikt zwischen Tourlängenminimierung und Wartezeitminimierung zu beachten.

⁴³⁵ LARSEN berechnet die Wartezeit, abweichend von der hier verwendeten Definition, als die Zeitspanne zwischen Auftragseingang und Ankunft des Fahrzeuges beim Kunden (Servicestartzeitpunkt).

Die folgenden Abbildungen A2-1 bis A2-4 und Tabellen A2-4 bis A2-7 zeigen die resultierende Tour bei Lösung des DTSPs aus LARSEN unter Anwendung der verschiedenen Verfahren. Allerdings werden nur die Verfahrensvarianten mit *Änderung aktueller Zug nicht möglich* dargestellt.

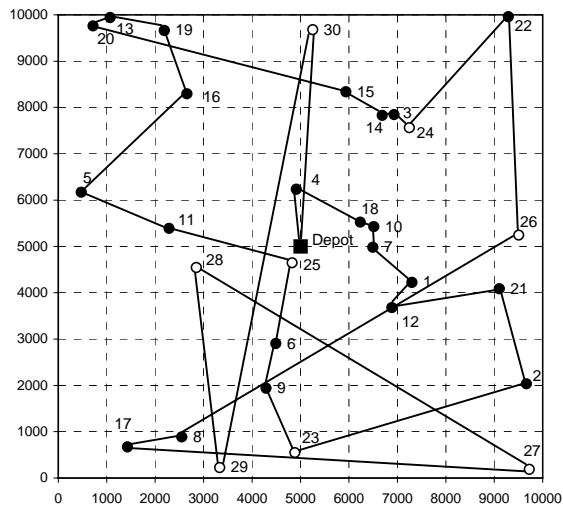


Abb. A2-1: Lösung durch Bester Nachfolger

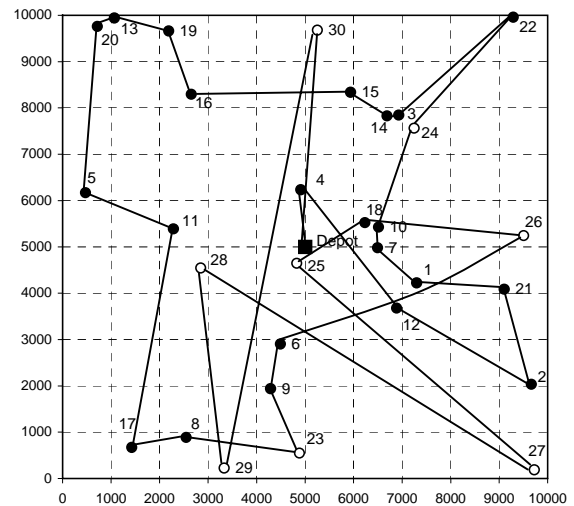


Abb. A2-2: Lösung durch Savings-Verfahren

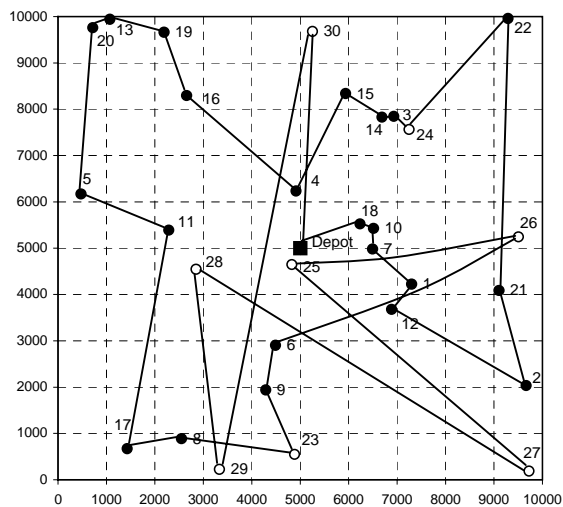
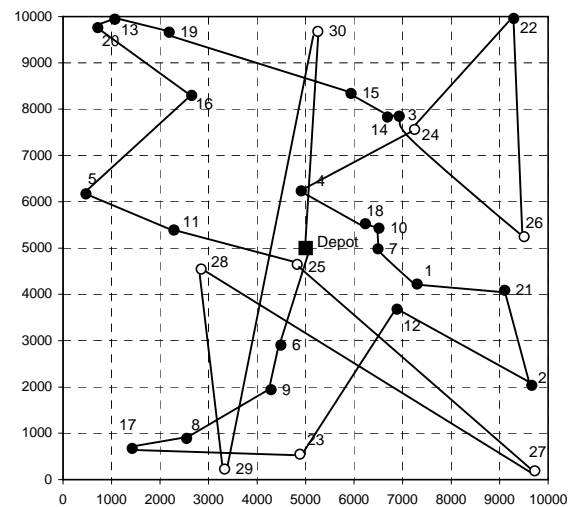
Abb. A2-3: Lösung durch Sukzessive
Einbeziehung

Abb. A2-4: Lösung durch Verfahren von Christofides

Nr.	Service- endzeit [in h]	Auftragsein- gangszeit [in h]	Wartezeit [in h]
4	8,05	8,00	0,05
18	8,16	8,00	0,16
10	8,23	8,00	0,23
7	8,28	8,00	0,28
1	8,34	8,00	0,34
12	8,39	8,00	0,39
21	8,48	8,00	0,48
2	8,58	8,00	0,58
23	8,74	8,16	0,58
9	8,81	8,00	0,81
6	8,87	8,00	0,87
25	9,06	8,84	0,22
11	9,18	8,00	1,18
5	9,25	8,00	1,25
16	9,39	8,00	1,39
19	9,52	8,00	1,52
13	9,58	8,00	1,58
20	9,66	8,00	1,66
15	9,82	8,00	1,82
14	9,88	8,00	1,88
3	9,91	8,00	1,91
24	9,96	8,36	1,60
22	10,09	8,00	2,09
26	10,26	9,27	0,99
8	10,52	8,00	2,52
17	10,56	8,00	2,56
27	10,98	10,75	0,23
28	11,48	11,26	0,22
29	13,10	12,96	0,14
30	13,82	13,54	0,28

Tab. A2-4: Route nach Bester Nachfolger

Nr.	Service- endzeit [in h]	Auftragsein- gangszeit [in h]	Wartezeit [in h]
4	8,05	8,00	0,05
12	8,16	8,00	0,16
2	8,29	8,00	0,29
21	8,37	8,00	0,37
1	8,45	8,00	0,45
7	8,52	8,00	0,52
10	8,59	8,00	0,59
24	8,68	8,36	0,32
22	8,81	8,00	0,81
3	8,91	8,00	0,91
14	8,96	8,00	0,96
15	9,01	8,00	1,01
16	9,16	8,00	1,16
19	9,29	8,00	1,29
13	9,35	8,00	1,35
20	9,43	8,00	1,43
5	9,53	8,00	1,53
11	9,64	8,00	1,64
17	9,78	8,00	1,78
8	9,86	8,00	1,86
23	9,95	8,16	1,79
9	10,02	8,00	2,02
6	10,07	8,00	2,07
26	10,27	9,27	1,00
18	10,43	8,00	2,43
25	10,62	8,84	1,78
27	10,93	10,75	0,18
28	11,48	11,26	0,22
29	13,10	12,96	0,14
30	13,82	13,54	0,28

Tab. A2-5: Route nach Savings-Verfahren

Nr.	Service- endzeit [in h]	Auftragsein- gangszeit [in h]	Wartezeit [in h]
18	8,11	8,00	0,11
10	8,17	8,00	0,17
7	8,23	8,00	0,23
1	8,29	8,00	0,29
12	8,34	8,00	0,34
2	8,46	8,00	0,46
21	8,55	8,00	0,55
22	8,75	8,00	0,75
24	8,86	8,36	0,50
3	8,90	8,00	0,90
14	8,95	8,00	0,95
15	8,99	8,00	0,99
4	9,07	8,00	1,07
16	9,21	8,00	1,21
19	9,34	8,00	1,34
13	9,41	8,00	1,41
20	9,48	8,00	1,48
5	9,59	8,00	1,59
11	9,70	8,00	1,70
17	9,83	8,00	1,83
8	9,91	8,00	1,91
23	10,00	8,16	1,84
9	10,08	8,00	2,08
6	10,13	8,00	2,13
26	10,33	9,27	1,06
25	10,59	8,84	1,75
27	10,93	10,75	0,18
28	11,48	11,26	0,22
29	13,10	12,96	0,14
30	13,82	13,54	0,28

Nr.	Service- endzeit [in h]	Auftragsein- gangszeit [in h]	Wartezeit [in h]
6	8,08	8,00	0,08
9	8,14	8,00	0,14
8	8,24	8,00	0,24
17	8,29	8,00	0,29
23	8,41	8,16	0,25
12	8,54	8,00	0,54
2	8,66	8,00	0,66
21	8,75	8,00	0,75
1	8,82	8,00	0,82
7	8,90	8,00	0,90
10	8,96	8,00	0,96
18	9,05	8,00	1,05
4	9,10	8,00	1,10
24	9,21	8,36	0,85
22	9,34	8,00	1,34
26	9,52	9,27	0,25
3	9,63	8,00	1,63
14	9,68	8,00	1,68
15	9,72	8,00	1,72
19	9,92	8,00	1,92
13	9,98	8,00	1,98
20	10,05	8,00	2,05
16	10,18	8,00	2,18
5	10,27	8,00	2,27
11	10,38	8,00	2,38
25	10,59	8,84	1,75
27	10,93	10,75	0,18
28	11,48	11,26	0,22
29	13,10	12,96	0,14
30	13,82	13,54	0,28

Tab. A2-6: Route nach Sukzessive Einbeziehung

Tab. A2-7: Route nach Verfahren von Christofides

Bei allen Verfahren erreicht das Fahrzeug das Depot 13:57 Uhr, da jeweils Kunde 30 der zuletzt bediente ist, und zwischen dem Bekanntwerden der Kunden 27 bis 30 so große Abstände liegen, dass es hierbei zu keinen Unterschieden zwischen den Methoden kommt.

Verfahren	Bester Nachfolger	Sukzessive Einbeziehung	Christofides	Savings- verfahren
Rundreiselänge (Änderung aktueller Zug <i>nicht</i> möglich)	88,9 km	88,3 km	88,4 km	89,5 km
Rundreiselänge ohne Kunde 27 bis 30 (Änderung aktueller Zug <i>nicht</i> möglich)	59,4 km	55,2 km	55,4 km	56,4 km
Rundreiselänge (Änderung aktueller Zug möglich)	88,9 km	87,6 km	87,9 km	89,5 km
Rundreiselänge ohne Kunde 27 bis 30 (Änderung aktueller Zug möglich)	59,4 km	54,5 km	54,9 km	56,4 km

Tab. A2-8: Rundreiselängen nach den modifizierten Verfahren bei Reduzierung des Problems

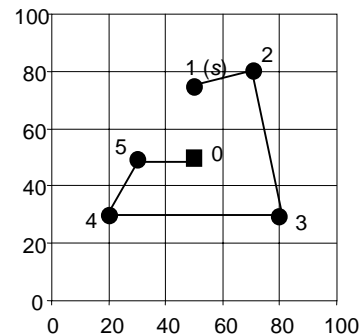
Tabelle A2-8 zeigt einen Vergleich der Rundreiselängen für das Gesamtproblem mit den Rundreiselängen, wenn die Kunden 27 bis 30 nicht erscheinen würden, also die Kunden die Fahrpausen für das Fahrzeug bewirken. Das bedeutet, das Fahrzeug kehrt beim Besten Nachfolger nach Kunde 17, bei der Sukzessiven Einbeziehung, beim Verfahren nach Christofides und beim Savingsverfahren nach Kunde 25 zum Depot zurück (vgl. Tabelle A2-4 bis A2-7). Bei der Reduzierung des Problems zeigt sich die Überlegenheit des modifizierten Verfahrens Sukzessive Einbeziehung, des modifizierten Verfahrens nach Christofides und des modifizierten Savingsverfahrens gegenüber dem modifizierten Verfahren Bester Nachfolger noch deutlicher.

Anhang A3:*Beispiel zum mathematischen Modell für das DTSP*

(Vgl. Abbildung 4-9: Beispiel zur modifizierten Sukzessiven Einbeziehung, Grafik 2 (9:00 Uhr))

Datenmatrix: 0 = Depot, 1 = s (Startknoten)

c(i,j)	0	1	2	3	4	5
0	0	25	36	36	36	20
1	25	0	25	54	55	33
2	36	25	0	51	71	50
3	36	54	51	0	60	54
4	36	55	71	60	0	22
5	20	33	50	54	22	0



Zielfunktion:

$$25 \cdot x(0,1) + 36 \cdot x(0,2) + 36 \cdot x(0,3) + 36 \cdot x(0,4) + 20 \cdot x(0,5) + 25 \cdot x(1,2) + 54 \cdot x(1,3) + 55 \cdot x(1,4) + 33 \cdot x(1,5) + 51 \cdot x(2,3) + 71 \cdot x(2,4) + 50 \cdot x(2,5) + 60 \cdot x(3,4) + 54 \cdot x(3,5) + 22 \cdot x(4,5) \rightarrow \min \quad (5.1)$$

Nebenbedingungen:

$$i=2: \quad x(0,2) + x(1,2) + x(2,3) + x(2,4) + x(2,5) = 2 \quad (5.2)$$

$$i=3: \quad x(0,3) + x(1,3) + x(2,3) + x(3,4) + x(3,5) = 2$$

$$i=4: \quad x(0,4) + x(1,4) + x(2,4) + x(3,4) + x(4,5) = 2$$

$$i=5: \quad x(0,5) + x(1,5) + x(2,5) + x(3,5) + x(4,5) = 2$$

$$i=1: \quad x(0,1) + x(1,2) + x(1,3) + x(1,4) + x(1,5) = 1 \quad (5.3)$$

$$i=0: \quad x(0,1) + x(0,2) + x(0,3) + x(0,4) + x(0,5) = 1$$

$$A=\{2,3\} \quad x(0,2) + x(0,3) + x(1,2) + x(1,3) + x(2,4) + x(2,5) + x(3,4) + x(3,5) \geq 2 \quad (5.4)$$

$$A=\{2,4\} \quad x(0,2) + x(0,4) + x(1,2) + x(1,4) + x(2,3) + x(2,5) + x(3,4) + x(4,5) \geq 2$$

$$A=\{2,5\} \quad x(0,2) + x(0,5) + x(1,2) + x(1,5) + x(2,3) + x(2,4) + x(3,5) + x(4,5) \geq 2$$

$$A=\{3,4\} \quad x(0,3) + x(0,4) + x(1,3) + x(1,4) + x(2,3) + x(2,4) + x(3,5) + x(4,5) \geq 2$$

$$A=\{3,5\} \quad x(0,3) + x(0,5) + x(1,3) + x(1,5) + x(2,3) + x(2,5) + x(3,4) + x(4,5) \geq 2$$

$$A=\{4,5\} \quad x(0,4) + x(0,5) + x(1,4) + x(1,5) + x(2,4) + x(2,5) + x(3,4) + x(3,5) \geq 2$$

$$A=\{2,3,4\} \quad x(0,2) + x(0,3) + x(0,4) + x(1,2) + x(1,3) + x(1,4) + x(2,5) + x(3,5) + x(4,5) \geq 2 \quad (5.5)$$

$$A=\{2,3,5\} \quad x(0,2) + x(0,3) + x(0,5) + x(1,2) + x(1,3) + x(1,5) + x(2,4) + x(3,4) + x(4,5) \geq 2$$

$$A=\{2,4,5\} \quad x(0,2) + x(0,4) + x(0,5) + x(1,2) + x(1,4) + x(1,5) + x(2,3) + x(3,4) + x(3,5) \geq 2$$

$$A=\{3,4,5\} \quad x(0,3) + x(0,4) + x(0,5) + x(1,3) + x(1,4) + x(1,5) + x(2,3) + x(2,4) + x(2,5) \geq 2$$

$$B=\{0,1\} \quad x(0,2) + x(0,3) + x(0,4) + x(0,5) + x(1,2) + x(1,3) + x(1,4) + x(1,5) = 2 \quad (5.6)$$

$$x(i,j) \in \{0,1\} \quad (5.7)$$

Lösung:⁴³⁶

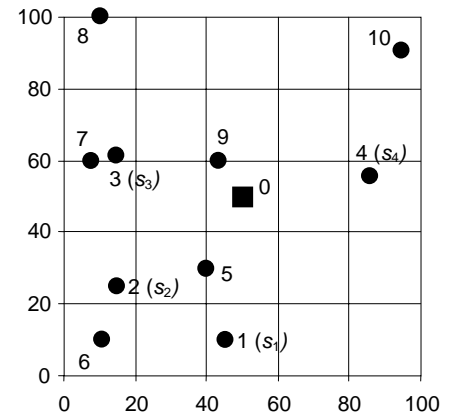
$$x(0,5) = x(1,2) = x(2,3) = x(3,4) = x(4,5) = 1, \quad \text{ZF-Wert: 178,000 km}$$

⁴³⁶ Die Lösung wurde mit der Software Gams bestimmt.

Anhang A4:*Beispiel zum mathematischen Modell für das DVRP*

(Vgl. Abbildung 4-18: Beispiel zum modifizierten Savingsverfahren (DVRP), Grafik 3 (9:00 Uhr))

$c(i,j)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	39	41	34	37	22	57	41	64	11	60
1	39	0	30	57	62	19	35	60	95	49	93
2	41	30	0	36	76	23	17	36	75	45	101
3	34	57	36	0	69	39	52	8	39	27	82
4	37	62	76	69	0	54	90	77	88	42	35
5	22	19	23	39	54	0	36	42	76	30	81
6	57	35	17	52	90	36	0	50	90	61	117
7	41	60	36	8	77	42	50	0	40	35	90
8	64	95	75	39	88	76	90	40	0	53	86
9	11	49	45	27	42	30	61	35	53	0	58
10	60	93	101	82	35	81	117	90	86	58	0



Hinweis: Die Knoten wurden neu durchnummeriert, wobei die Knoten 1 bis 4 die aktuellen Fahrzeugpositionen der vier bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge darstellen.

Der Fuhrpark wird auf 5 Fahrzeuge mit einer Kapazität $Q=5$ beschränkt. Die ersten 4 Fahrzeuge sind die bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge. Daher ergeben sich folgenden Kapazitäten in Abhängigkeit der bereits durch das Fahrzeug bedienten Kunden: $cap_1=3$, $cap_2=1$, $cap_3=3$, $cap_4=2$.

Das fünfte Fahrzeug hat eine Kapazität $cap_5=Q=5$, da es noch nicht im Einsatz ist.

$V=\{0,1,\dots,10\}$, mit $i=0$ Depot, $i=1,\dots,4$ aktuelle Fahrzeugpositionen (Startpunkte) und $i=5,\dots,10$ unbediente Kunden

$$\text{Zielfunktion: } c_{12} \cdot (x_{121} + x_{122} + x_{123} + x_{124} + x_{125}) + c_{13} \cdot (x_{131} + x_{132} + x_{133} + x_{134} + x_{135}) + \dots + c_{810} \cdot (x_{8101} + x_{8102} + x_{8103} + x_{8104} + x_{8105}) + c_{910} \cdot (x_{9101} + x_{9102} + x_{9103} + x_{9104} + x_{9105}) \rightarrow \min \quad (5.10)$$

Nebenbedingungen:

$$i=5 \quad x_{051} + x_{052} + x_{053} + x_{054} + x_{055} + x_{151} + x_{152} + x_{153} + \dots + x_{455} + x_{561} + \dots + x_{5105} = 2 \quad (5.11)$$

$$i=6 \quad x_{061} + x_{062} + x_{063} + x_{064} + x_{065} + x_{161} + x_{162} + x_{163} + \dots + x_{565} + x_{671} + \dots + x_{6105} = 2$$

\vdots

$$i=10 \quad x_{0101} + x_{0102} + x_{0103} + x_{0104} + x_{0105} + x_{1101} + x_{1102} + x_{1103} + \dots + x_{9105} = 2$$

$$i=1 (s_1) \quad x_{011} + x_{012} + x_{013} + x_{014} + x_{015} + x_{111} + \dots + x_{121} + \dots + x_{1105} = 1 \quad (5.12)$$

\vdots

$$i=4 (s_4) \quad x_{041} + x_{042} + x_{043} + x_{044} + x_{045} + x_{141} + x_{142} + x_{143} + \dots + x_{345} + x_{451} + \dots + x_{4105} = 1$$

$$H=\{1,2\} \quad x_{131} + \dots + x_{135} + x_{141} + \dots + x_{105} + x_{231} + \dots + x_{235} + x_{241} + x_{205} + x_{011} + \dots + x_{015} + x_{021} + \dots + x_{025} \geq 1 \quad (5.13)$$

\vdots

$$H=\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\} \dots$$

$$i=5, k=1 \quad x_{0\ 5\ 1}+x_{1\ 5\ 1}+\dots+x_{4\ 5\ 1}+x_{5\ 6\ 1}+\dots+x_{5\ 10\ 1}=2 \cdot y_{5\ 1} \quad (5.14)$$

$$\vdots$$

$$i=5, k=5 \quad x_{0\ 5\ 5}+x_{1\ 5\ 5}+\dots+x_{4\ 5\ 5}+x_{5\ 6\ 5}+\dots+x_{5\ 10\ 5}=2 \cdot y_{5\ 5}$$

$$i=6, k=1 \quad x_{0\ 6\ 1}+x_{1\ 6\ 1}+\dots+x_{5\ 6\ 1}+x_{6\ 7\ 1}+\dots+x_{6\ 10\ 1}=2 \cdot y_{6\ 1}$$

$$\vdots$$

$$i=10, k=5 \quad x_{0\ 10\ 5}+x_{1\ 10\ 5}+\dots+x_{9\ 10\ 5}=2 \cdot y_{10\ 1}$$

$$i=1, k=1 \quad x_{0\ 1\ 1}+x_{1\ 2\ 1}+\dots+x_{1\ 10\ 1}=y_{1\ 1} \quad (5.15)$$

$$\vdots$$

$$i=1, k=5 \quad x_{0\ 1\ 5}+x_{1\ 2\ 5}+\dots+x_{1\ 10\ 5}=y_{1\ 5}$$

$$i=2, k=1 \quad x_{0\ 2\ 1}+x_{1\ 2\ 1}+x_{2\ 3\ 1}+\dots+x_{2\ 10\ 1}=2 \cdot y_{2\ 1}$$

$$\vdots$$

$$i=4, k=5 \quad x_{0\ 4\ 5}+x_{1\ 4\ 5}+x_{2\ 4\ 5}+x_{3\ 4\ 5}+x_{4\ 5\ 5}+\dots+x_{4\ 10\ 5}=y_{4\ 5}$$

$$k=1 \quad b_1 \cdot y_{1\ 1}+b_2 \cdot y_{2\ 1}+\dots+b_{10} \cdot y_{10\ 1} \leq \text{cap}_1 \quad (5.16)$$

$$k=2 \quad b_1 \cdot y_{1\ 2}+b_2 \cdot y_{2\ 2}+\dots+b_{10} \cdot y_{10\ 2} \leq \text{cap}_2$$

$$k=3 \quad b_1 \cdot y_{1\ 3}+b_2 \cdot y_{2\ 3}+\dots+b_{10} \cdot y_{10\ 3} \leq \text{cap}_3$$

$$k=4 \quad b_1 \cdot y_{1\ 4}+b_2 \cdot y_{2\ 4}+\dots+b_{10} \cdot y_{10\ 4} \leq \text{cap}_4$$

$$k=5 \quad b_1 \cdot y_{1\ 5}+b_2 \cdot y_{2\ 5}+\dots+b_{10} \cdot y_{10\ 5} \leq \text{cap}_5$$

$$i=1: y_{1\ 1}=1, \quad i=2: y_{2\ 2}=1, \quad i=3: y_{3\ 3}=1, \quad i=4: y_{4\ 4}=1 \quad (5.17)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (5.18)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad (5.19)$$

Lösung:⁴³⁷

$$x(0,5,1) = x(1,5,1) = x(0,6,2) = x(2,6,2) = x(0,8,3) = x(7,8,3) = x(3,7,3) = x(0,9,4) = x(4,10,4) = x(9,10,4) = 1$$

$$y(1,1) = y(5,1) = y(2,2) = y(6,2) = y(3,3) = y(7,3) = y(8,3) = y(4,4) = y(9,4) = y(10,4) = 1$$

ZF-Wert: 331 km

⁴³⁷ Die Lösung wurde mit der Software Gams bestimmt.

Anhang A5:*Beispiel für dynamische Tourenplanung - 25 Kunden*

Im folgenden Beispiel erfolgt die Durchführung der dynamischen Tourenplanung für eine Problemstellung, die aus 15 statischen und 10 dynamischen Kunden besteht, wie nachstehenden Tabellen zu entnehmen ist.

Nr.	x	y	SZ [in min]	Bedarf [in ME]	AZ [in h]
1	61	73	10	4	8,00
2	88	33	11	4	8,00
3	19	41	11	4	8,00
4	88	81	14	1	8,00
5	10	47	15	2	8,00
6	78	78	12	2	8,00
7	12	99	5	5	8,00
8	66	69	13	2	8,00
9	61	32	11	5	8,00
10	30	83	6	5	8,00
11	77	73	6	1	8,00
12	22	74	15	1	8,00
13	36	96	14	1	8,00
14	28	96	8	2	8,00
15	57	96	10	3	8,00

Tab. A5-1: Daten statische Kunden (Bezeichnungen: Nr. - Bezeichnung des Kunden, x,y - Koordinaten, SZ - Standzeit, Bedarf - abzuholende Menge beim Kunden, AZ - Auftragseingangszeit)

Nr.	x	y	SZ [in min]	Bedarf [in ME]	AZ [in h]
16	59	3	12	3	8,28
17	72	53	5	4	9,09
18	66	19	10	1	9,34
19	36	2	7	5	9,39
20	25	12	11	1	9,92
21	53	28	6	5	10,30
22	10	25	7	2	11,09
23	43	78	9	3	11,31
24	95	82	6	5	11,59
25	40	39	5	3	11,95

Tab. A5-2: Daten dynamische Kunden (Bezeichnungen: Nr. - Bezeichnung des Kunden, x,y - Koordinaten, SZ - Standzeit, Bedarf - abzuholende Menge beim Kunden, AZ - Auftragseingangszeit)

Die maximale Kapazität je Fahrzeug beträgt 25 ME (Mengeneinheiten) und die Fahrzeuge bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h. Abbildung A5-1 zeigt die geographische Lage aller Kunden und die tatsächlich gefahrenen Strecken der Fahrzeuge bei Anwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens mit Variante *Änderung aktueller Zug möglich*.

Die folgende Tabelle fasst die im Zeitablauf auftretenden Ereignisse zusammen, die zu den in Abbildung A5-1 aufgezeigten Touren führen. Der Operationszeitraum beginnt 8:00 Uhr.

Zeitpunkt	Ereignis
< 8,00	Erstellung des Tourenplans für die 15 statischen Kunden
8,00	Start der Fahrzeuge
8,28	Kunde 16 tritt auf
8,68	Kunde 1 bedient
8,99	Kunde 12 bedient
9,09	Kunde 17 tritt auf
9,23	Kunde 17 bedient
9,32	Kunde 10 bedient
9,34	Kunde 18 tritt auf
9,39	Kunde 19 tritt auf
9,89	Kunde 7 bedient
9,91	Kunde 3 bedient
9,92	Kunde 20 tritt auf
9,93	Kunde 2 bedient
10,30	Kunde 21 tritt auf
10,35	Kunde 14 bedient
10,38	Kunde 5 bedient
10,61	Kunde 18 bedient
10,74	Kunde 13 bedient
11,09	Kunde 22 tritt auf
11,16	Kunde 16 bedient
11,31	Kunde 23 tritt auf
11,33	Kunde 15 bedient
11,42	Kunde 21 bedient
11,59	Kunde 24 tritt auf
11,74	Kunde 19 bedient
11,78	Kunde 9 bedient
11,95	Kunde 25 tritt auf
12,22	Kunde 20 bedient
12,25	Kunde 23 bedient
12,30	Kunde 8 bedient
12,36	Kunde 25 bedient
12,66	Fahrzeug der Tour (0-3-5-21-9-25-0) erreicht das Depot
12,73	Kunde 22 bedient
12,80	Kunde 6 bedient
12,83	Fahrzeug der Tour (0-12-10-7-14-13-15-23-0) erreicht das Depot
13,24	Kunde 4 bedient
13,48	Kunde 24 bedient
13,68	Fahrzeug der Tour (0-1-17-2-18-16-19-20-22-0) erreicht das Depot
13,98	Kunde 11 bedient
14,69	Fahrzeug der Tour (0-8-6-4-24-11-0) erreicht das Depot

Tab. A5-4: Ereignisse im dynamischen Tourenplanungsprozess bei Anwendung des modifizierten Savingsverfahrens bei Variante *Änderung aktueller Zug möglich*

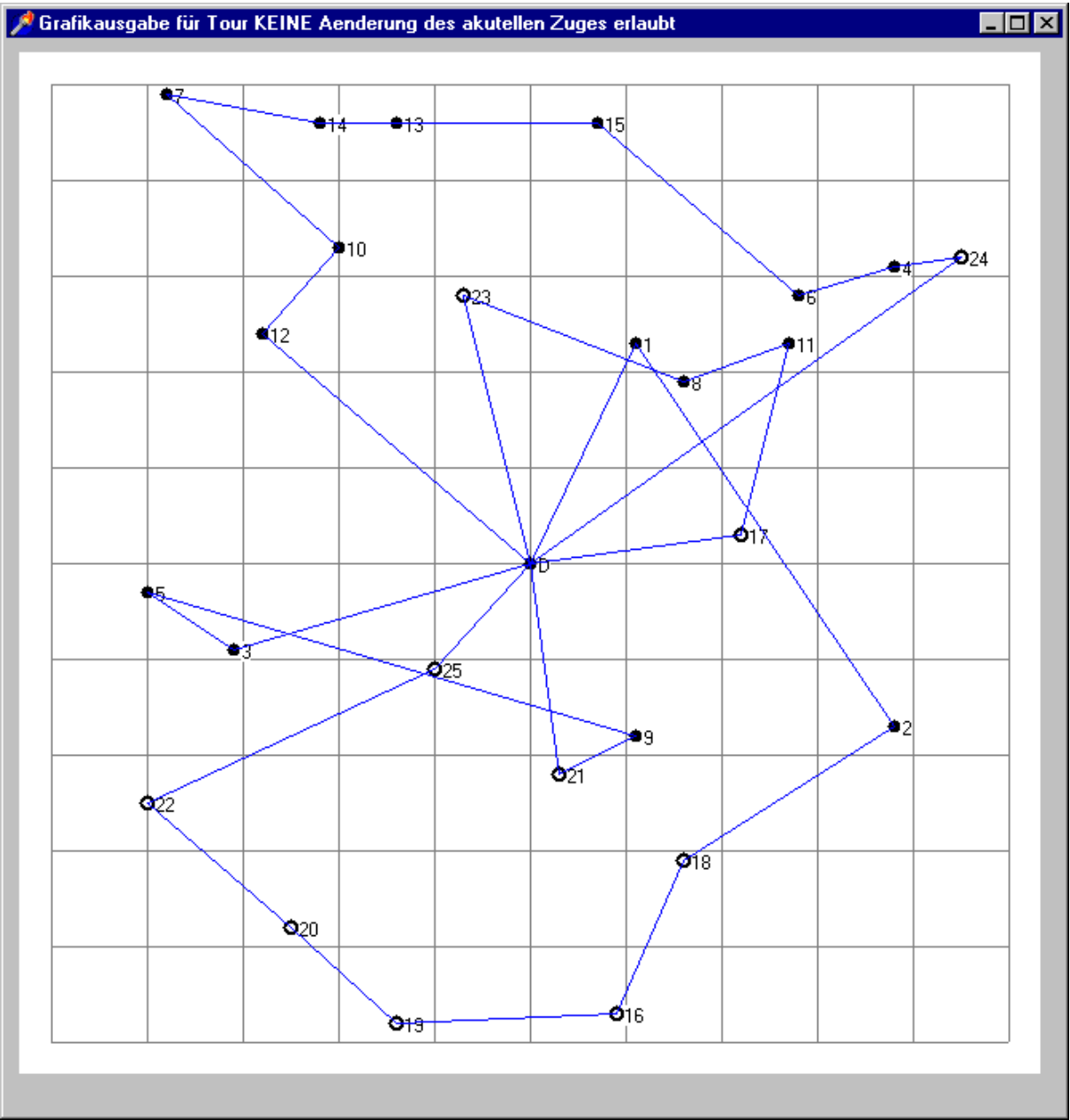


Abb. A5-2: Geographische Lage aller Kunden und die tatsächlich gefahrenen Strecken der Fahrzeuge bei Anwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens mit Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich*

Touren	
0-1-2-18-16-19-20-22-25-0	223,0 km
0-3-5-9-21-0	127,4 km
0-12-10-7-14-13-15-6-4-24-0	218,7 km
0-23-8-11-17-0	108,1 km

Tab. A5-5: Gefahrene Touren

Die Gesamtlänge des Tourenplans beträgt 677,2 km (vgl. Tabelle A5-5) bei Anwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens mit Variante *Änderung aktueller Zug möglich*.

Anhang A6:*Erzeugung von Benchmarks für die dynamische Tourenplanung unter Anwendung eines Kundenzeitfensterkonzeptes*

Zur Erzeugung der Benchmark für ein Beispiel der dynamischen Tourenplanung kann eine ex-post Optimierung durchgeführt werden. Dabei sind alle Daten bekannt, auch die dynamischen Kunden mit ihren Auftrittszeitpunkten. Durch ein geeignetes Tourenplanungsverfahren erfolgt die Erzeugung der Lösung für diese statische Problemstellung. Das Ergebnis, die Benchmark, wird mit der Lösung, die ohne vollkommene Voraussicht erzielt wurde (z. B. mittels der in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren), verglichen. Damit kein dynamischer Kunde vor seinem Auftragseingang durch ein Fahrzeug erreicht wird, werden die dynamischen Kunden mit harten Zeitfenstern versehen, wie in der Zusammenfassung zu dieser Arbeit skizziert. Das untere Zeitfensterende stellt den Zeitpunkt des Auftragseinganges dar und das obere ist offen oder symbolisiert das Ende des Planungszeitraumes. Die Ermittlung des Tourenplans erfolgt hier unter Verwendung des Savingsverfahrens für statische Problemstellungen mit der Erweiterung für Kundenzeitfenster nach FLEISCHMANN.⁴³⁸ Zwei Beispiele werden im Folgenden hierzu gerechnet. Das erste bezieht sich auf das Beispiel, das zur Erklärung des *modifizierten* Savingsverfahrens in Kapitel 4.3.2 verwendet wurde, und das zweite auf die Beispieldaten in Anhang A5.⁴³⁹

Beispiel 1:

Die folgende Tabelle enthält den Tourenplan zu Beispiel 1.

Tourenplan	
Tour	Länge
0-7-11-5-0	140,8 km
0-2-9-0	115,0 km
0-8-10-4-0	148,2 km
0-1-3-6-0	102,5 km
Gesamtlänge aller Touren	506,5 km

Tab. A6-1: Tourenplan 1. Beispiel

Wird rückwirkend versucht die beste Lösung bei Sicherheit aller Daten zu bestimmen, wie hier durch zu Hilfenahme des Kundenzeitfensterkonzeptes simuliert, zeigt sich, dass der Tourenplan eine Gesamtlänge über alle Touren von 506,5 km aufweist. Das Ergebnis aus Kapitel 4.3.2 hat einen Wert von 531,1 km für den Tourenplan der unter Verwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens mit *Änderung aktueller Zug möglich* konstruiert wurde und

⁴³⁸ Vgl. Fleischmann, B. (1998), S. 296 f.

⁴³⁹ Die Daten zu den Beispielen befinden sich in Kapitel 4.3.2 und in Anhang A5.

613,9 für den Tourenplan bei *Änderung aktueller Zug nicht möglich*. Die erhaltenen Lösungen bei Anwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens weichen damit um 4,9 % bzw. 21,2 % von der Benchmark ab. Zu beachten ist, dass die Startzeit von Tour 0-7-11-5-0 am Depot 8,217 h ist, da sonst während der Ausführung der Tour das Fahrzeug eine Wartezeit hätte.⁴⁴⁰ Alle anderen Touren starten 8 h am Depot.⁴⁴¹

Beispiel 2:

Die folgende Tabelle enthält den Tourenplan zu Beispiel 2.

Tourenplan	
Tour	Länge
0-12-10-7-14-13-15-23-0	169,9 km
0-9-21-0	52,2 km
0-17-8-6-4-24-11-1-0	133,4 km
0-2-18-16-19-20-22-5-3-25-0	211,7 km
Gesamtlänge aller Touren	567,2 km

Tab. A6-2: Tourenplan 2. Beispiel

Hier waren die Lösungen 660,5 km bei Anwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens mit Variante *Änderung aktueller Zug möglich* und 677,2 km bei Anwendung des *modifizierten* Savingsverfahrens mit Variante *Änderung aktueller Zug nicht möglich*, d. h. sie liegen um 16,4 % und 19,4 % über der Gesamtlänge aller Touren der Benchmark. Die Startzeiten für die Fahrzeuge am Depot betragen der Reihe nach 8,259 h, 9,938 h, 9,09 h und 8,0 h.

⁴⁴⁰ Wartezeiten zwischen der Bedienung zweier Kunden einer Tour sind beim Kundenzeitfensterkonzept nach Fleischmann nicht zulässig.

⁴⁴¹ Die reguläre Startzeit der Fahrzeuge am Depot ist 8:00 Uhr (= 8 h). Die Geschwindigkeit beträgt konstant 50 km/h. Vgl. hierzu auch Kap. 4.3.2.

Anhang A7:*Begriffe der Graphentheorie*

Im Verfahren von Christofides werden die Begriffe "Minimalgerüst", "Knotengrad", "minimales Summen-Matching", "Euler-Tour" und "Hamilton-Kreis" verwendet. Dazu folgt jeweils eine kurze Erklärung,⁴⁴² wobei zu beachten ist, dass ein symmetrischer Graph $G=(V,E,c)$, mit V =Knotenmenge, E =Kantenmenge, c =Bewertungen der Kanten, unterstellt wird:

Knotengrad: Der Knotengrad KG_i gibt die Anzahl der mit einem Knoten inzidenten Kanten an. Es gilt:

- Die Summe über alle Knotengrade der Knoten eines Graphen ist gerade und sie ist gleich der doppelten Kantenanzahl, da jede Kante zwei Endpunkte hat (Jede Kante ist mit zwei Knoten inzident.):

$$\sum_{i=0}^n KG_i = 2|E|$$

- Die Anzahl der Knoten mit ungeradem Grad ist stets gerade.

Gerüst: Ein Gerüst $G' = (V', E')$ ist ein zusammenhängender, kreisfreier Teilgraph von $G = (V, E)$ mit $V'=V$ und $E' \subset E$.

Minimalgerüst: Ein Minimalgerüst $G^* = (V, E^*, c)$ stellt unter allen Gerüsten $G' = (V, E', c)$ mit $E' \subset E$ dasjenige Gerüst G^* dar, bei dem die Summe der zugehörigen Kantenbewertungen minimal ist:

$$c(G^*) = \min_{G'} c(G') = \min_{E' \subset E} \sum_{[v_i, v_j] \in E'} c_{v_i, v_j}$$

Euler-Tour: Eine geschlossene Kantenfolge in einem Graph $G=(V,E)$, die jede Kante genau einmal enthält, heißt Euler-Tour. Der Graph wird dann dementsprechend als Euler-Graph bezeichnet. Existenzbedingung für eine Euler-Tour: Wenn jeder Knoten v_i eines zusammenhängenden Graphen $G=(V,E)$ einen geraden Knotengrad g_i besitzt, enthält dieser Graph eine Euler-Tour.

Matching⁴⁴³: Eine Teilmenge $\tilde{E} \subset E$ in einem Graphen $G = (V, E, c)$ wird als Matching bezeichnet, wenn keine zwei verschiedenen Kanten aus \tilde{E} mit ein und demselben Knoten von G inzident sind. Ein Matching \tilde{E} in G heißt vollständig (perfekt), wenn jeder Knoten von G Endknoten einer Matching-

⁴⁴² Detaillierte Erklärungen zu den Begriffen finden sich bei CLARK, DOMSCHKE, UHR/LASCH, LAWLER, NEUMANN/MORLOCK und VOLKMANN. Vgl. Clark, J. (1994), S. 15 ff., Domschke, W. (1997), S. 2 ff., Uhr, W./Lasch, R. (2003), S. B3.3, Lawler, E. (2001), S. 15 ff., Neumann, K./Morlock, M. (2002), S. 177 ff. und Volkmann, L. (1996), S. 34 ff.

⁴⁴³ Vgl. Diestel, R. (1996), S. 31 ff. und Lawler, E. (2001), S. 182 ff.

Kante ist. Ein Matching \tilde{E} in G ist maximal, wenn es kein Matching \tilde{E}' in G mit $|\tilde{E}'| > |\tilde{E}|$ gibt.

Ein minimales Summen-Matching \tilde{E}^* ist dasjenige Matching aus \tilde{E}_p , der Menge aller perfekten Matchings von G , welches durch folgende Optimierung gelöst wird:

$$\min \sum_{[v_i, v_j] \in \tilde{E}} c_{v_i v_j}, \text{ mit } \tilde{E} \in \tilde{E}_p$$

Es gilt somit für die Bestimmung eines minimalen Summen-Matching \tilde{E}^* beim Verfahren von Christofides, dass das minimale Summen-Matching die Eigenschaften perfekt und maximal besitzt, da die Anzahl der Knoten mit ungeradem Grad, mit denen das Matching gebildet wird, gerade ist.

Hamilton Kreis: Ist ein Kreis in G , der alle Knoten genau einmal enthält.